Pouzdanost određivanja propunosti slabo propusnih plinskih ležišta optimiranjem trajanja testa porasta tlaka

Koščak-Kolin, Sonja

Doctoral thesis / Disertacija

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:169:335426

Rights / Prava: Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 3.0

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

Sonja Koščak Kolin

POUZDANOST ODREĐIVANJA PROPUSNOSTI SLABO PROPUSNIH PLINSKIH LEŽIŠTA OPTIMIRANJEM TRAJANJA TESTA PORASTA TLAKA

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2018.

Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Sonja Koščak Kolin

POUZDANOST ODREĐIVANJA PROPUSNOSTI SLABO PROPUSNIH PLINSKIH LEŽIŠTA OPTIMIRANJEM TRAJANJA TESTA PORASTA TLAKA

DOKTORSKI RAD

Mentor:
Izv. prof. dr. sc. Tomislav Kurevija

Zagreb, 2018.



University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Sonja Koščak Kolin

RELIABILITY OF THE PERMEABILITY DETERMINATION OF THE LOW PERMEABILITY GAS RESERVOIRS BY OPTIMIZING THE PRESSURE BUILD-UP TEST DURATION

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:
Associate professor Tomislav Kurevija, PhD.

Zagreb, 2018.

MENTOR:

Dr. sc. Tomislav Kurevija

Izvanredni profesor Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Znanstveni savjetnik

SAŽETAK

U plinskim bušotinama slabo propusnih ležišta dolazi do odstupanja u određivanju propusnosti stijene primjenom analize testova porasta tlaka, jer bi mjerenje trebalo trajati i nekoliko godina. Stoga je optimiranjem trajanja testa porasta, razvijena nova metodologija u kojoj su odstupanja rezultata minimalna. Novi pristup rješavanju problema je detaljnije analiziranje krivulje porasta tlaka u tzv. nepoznatom području prijelaznog perioda, temeljem trajanja testa od samo sto sati. U metodi su primijenjene nove jednadžbe za ekstrapolaciju krivulje porasta i njene derivacije do početnog ležišnog tlaka, da bi se dokazalo u kojem vremenu teoretski dolazi do pseudo-radijalnog oblika protoka. Time je omogućena prilagodba konvencionalnih metoda za analizu testa porasta, koja obuhvaća modifikacije Bourdet dijagrama i jednadžbi za određivanje propusnosti u stimuliranim bušotinama ležišta pješčenjaka i šejlova.

Nova metoda je prilagođena i za pouzdanu primjenu u programu Saphir, putem novih jednadžbi za ulazno vrijeme i protok, uz uporabu efektivnog radijusa bušotine za pojedine tipove bušotina. Tada se svaku stimuliranu bušotinu u softveru analizira ekvivalentno vertikalnoj, uz odgovarajući efektivni radijus, što bez razvoja nove metodologije nije bilo moguće. Njena svrha je jedinstvena primjena na svim testovima porasta svakog slabo propusnog ležišta, bez potrebe za dugim periodom mjerenja, jer u literaturnim izvorima nema jedinstvenog pravila za interpretaciju prekratkih ispitivanja u nekonvencionalnim ležištima. Nova metoda je uspješno primijenjena na četiri testa u hidraulički frakturiranim i višestruko frakturiranim horizontalnim bušotinama, u slabo propusnim ležištima: Eagle Ford u Texasu, Perth Basin u Australiji, Montney u Alberti i Changqing u Kini.

Odavde slijedi potvrda hipoteze istraživanja da se analizom testa porasta može pouzdano procijeniti propusnost stijene slabo propusnog ležišta. Isto tako, potvrđeno je da se konvencionalne metode za analizu testa porasta mogu prilagoditi za primjenu u nekonvencionalnim ležištima plina. Osim toga, dokazana je i hipoteza da se analizom testa porasta može minimizirati trajanje ispitivanja u bušotinama slabo propusnih ležišta. Minimalno trajanje testa porasta tlaka od samo 100 sati će, kao rezultat istraživanja, značajno utjecati i na točnost primjene proizvodnih modela. Ono će također doprinijeti i kvalitetnijoj procjeni ekonomske isplativosti cjelokupnog ciklusa proizvodnje plina, čime bi se omogućio i veći broj ispitivanja bušotina u slabo propusnim ležištima.

Ključne riječi: ekstrapolirana krivulja testa porasta tlaka, slabo propusna plinska ležišta, modificirani Bourdet dijagram, pseudo-radijalni protok, propusnost stijene, stimulirane bušotine, primjena programa Saphir

EXTENDED ABSTRACT

The pressure build-up test analysis of gas wells in the low permeability reservoirs shows deviation in the calculation results for rock permeability, if new methodology is not applied. The standard method of the infinite acting radial flow could not be used without the development of a new method, as the duration of the build-up test should last for up to a few years. A new method is realized by optimizing the duration of the pressure build-up test, which gives minimal deviations of the results, even for short tests, lasting approximately only 100 hours. The basic approach to solving the problem of too long a duration of the build-up test in the low permeability gas reservoirs is the more detailed interpretation of the pressure curve in each phase of the transient period at the log-log diagram. It considers a new approach for the optimal extrapolation of the build-up curve to the unknown region of the transient period, which would theoretically last until the time when the initial pressure could be reached. This research was aimed at determining the conditions under which the conventional methods in the pressure build-up test analysis, like the type curve and its derivative, can be applied to the stimulated gas wells, resulting in the acceptable deviations of the value of the rock permeability as well. A new method can be generally divided into two parts, wherefrom the first one contains six steps for the optimal extrapolation of the pressure build-up curve and its derivative, discovering the period of the pseudo-radial flow at the log-log diagram. In this manner, the condition for the application of its second part is fulfilled. It consists of the Bourdet diagram modifications for the usage in shale and tight gas sand reservoirs, based on the effective radius for different stimulated wells. In such a way the resulting match pressure from both diagrams can be calculated and used in new, modified expressions for the permeability determination in multiple fractured horizontal wells and in fractured wells. A new method is also modified for the usage in the Saphir program, on the basis of the effective radius as well, where each stimulated well is analyzed as a vertical one, with the belonging value of the effective radius. New expressions for the constant flow and its duration before the well shut-in, are introduced for the usage in the Saphir program, depending upon the modified expressions for the permeability determination in the stimulated wells. The result of the estimated permeability in multi fractured horizontal well at the Eagle Ford shale reservoir, obtained by a new methodology is 0,005 mD (5E-18 m^2), while this value, determined by a new method in the Saphir program, is 0,004 mD. As both values of the rock permeability are in the range of acceptable deviations for the low

permeability reservoirs, it can be concluded that a new methodology is reliable for the analysis of each pressure build-up test with the minimum duration of only 100 hours. Furthermore, the method is successfully applied to three more pressure build-up tests at different low permeability gas reservoirs. Firstly, the method was conducted for a fractured well at the Perth Basin tight gas sand reservoir in Australia, as well as for the fractured well at the Montney tight gas sand in Alberta. The fourth pressure build-up test using which the method was proven, was made at the multi fractured horizontal well at the Changqing tight gas sand reservoir in China. The estimated values of rock permeabilities in those reservoirs are very close to the original, published values, correspondingly amounting to 0,004 mD, 0,05 mD and 0,4 mD in each well. The same values determined by a new method modified for the Saphir program, are 0,004 mD, 0,06 mD and 0,14 mD. These are almost the same results in comparison to the calculated ones, based on the modified Bourdet diagram. It can also been concluded that a new method presents an appropriate solution for the permeability determination based upon the optimization of the pressure build-up test duration in each stimulated well of low permeability gas reservoirs. The duration of the pressure build-up test in the unconventional reservoirs not only affects the deviation of the analysis results of the tested wells, and the accuracy of their future production models, but is also important for the economic viability of the entire production cycle. Furthermore, due to the successful minimization of the pressure build-up test duration in low permeability gas reservoirs to only 100 hours, a higher number of well testing can be expected worldwide in the future. This is also in accordance with the accepted scenario of the International Energy Agency that the percentage of gas from unconventional gas reservoirs in the total gas production should rise from today's 14% to 24% in 2035. A new method for the reliable permeability determination by analysis of short pressure build-up tests could also be widely used due to the presence of huge recoverable reserves of low permeability gas reservoirs amounting to 400E+12 m^3, a quantity twice as large as total proven gas reserves of 200E+12 m^3.

Keywords: pressure build-up test curve extrapolation, low permeability gas reservoirs, modified Bourdet diagram, pseudo-radial flow, rock permeability, stimulated wells, Saphir program applications

Disertacija sadrži:

- 244 stranica teksta;
- 115 slika;
- 42 tablice;
- 5 priloga;
- popis literaturnih referenci sa 100 navoda;
- sažetak s ključnim riječima na hrvatskom jeziku;
- prošireni sažetak s ključnim riječima na engleskom jeziku;
- životopis autorice;
- popis radova s 48 objavljenih djela.

SADRŽAJ

1. UVOD……...1

2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA METODA ZA ANALIZU TESTA PORASTA TLAKA…….……..……...9

2.1. Analiza neustaljenog protoka u bušotini…….……..10

2.1.1. Model radijalnog protoka iz ležišta u bušotinu…….……...……10

2.1.2. Primjena modela vertikalne bušotine u analizi testa porasta tlaka…...15

2.1.2.a Metoda polu-logaritamskog prikaza tlaka u funkciji vremena.....15

2.1.2.b Metoda tipskih krivulja…….……18

2.1.2.c Metoda derivacije tlaka…….……20

2.2. Analiza tlaka horizontalne bušotine……..……..…….…23

2.2.1. Model protoka kroz horizontalnu bušotinu…….……23

2.2.2. Primjena modela horizontalne bušotine u analizi testa porasta…….....29

2.3. Analiza tlaka frakturirane bušotine……..……33

2.3.1. Model protoka kroz vertikalnu pukotinu…….……33

2.3.2. Primjena modela frakturirane bušotine u analizi testa porasta…..……37

2.4. Analiza tlaka višestruko frakturirane horizontalne bušotine (VFHB)…...…38

2.4.1. Model protoka kroz VFHB…….……38

2.4.2. Primjena modela VFHB u analizi testa porasta tlaka……..……44

3. ANALIZA TESTA PORASTA TLAKA SLABO PROPUSNIH LEŽIŠTA…....46

3.1. Metoda prema autoru Lougheedu i suradnicima..……..…….……...46

3.2. Metoda prema autoru Bahramiju i suradnicima…….…….……...52

3.3. Primjena softvera Saphir i proizvodnog modela Houzea i suradnika.....59

4. RAZVOJ NOVE METODE ZA ANALIZU KRATKIH TESTOVA PORASTA TLAKA U SLABO PROPUSNIM PLINSKIM LEŽIŠTIMA……..……66

4.1. Odabir testa porasta tlaka za razvoj metode u VFHB..…….…….……...70

4.2. Odabir oblika parametra tlaka na log-log dijagramu testa porasta.……..…73

4.3. Opis razvoja metode……...……...…….…….……...77

4.3.1. Prvi korak – ključne točke na krivulji porasta…….……77

4.3.2. Drugi korak – period skladištenja i pomoćne točke.....……79

4.3.3. Treći korak – određivanje nagiba s pomoću novih (m_i,Δp)-dijagrama...82

4.3.4. Četvrti korak – ekstrapolirane točke za krivulju porasta…….……94

4.3.5. Međukorak – pomoćni (X, Δp) - dijagram za ekstrapolaciju krivulje...103
4.3.6. Peti korak – optimiranje ekstrapoliranih segmenata krivulje porasta...109
4.3.6.a Ekstrapolacija krivulje testa porasta do točke 9'…..…….....109
4.3.6.b Ekstrapolacija krivulje testa porasta do točke 9"…….…....114
4.3.6.c Ekstrapolacija krivulje testa porasta do točke 9'"……..…...116
4.3.7. Šesti korak – derivacija ekstrapolirane krivulje testa porasta…..……...121
4.4. Prilagodba metoda tipskih krivulja i derivacije tlaka .....…….…….…....127
4.4.1. Efektivni radijus bušotine…….……..……...129
4.4.2. Modificirani Bourdet log-log dijagram……..…….…....129
4.4.3. Modificirani izrazi za određivanje propusnosti stijene.…….……...135
4.4.4. Prilagodba nove metode za primjenu u programu Saphir…..……..137
5. PRIMJENA METODE U OSTALIM SLABO PROPUSNIM LEŽIŠTIMA.....141
5.1. Testovi porasta tlaka u frakturiranim bušotinama (FB)…...…...……141
5.1.1. Primjena nove metode na ležištu Perth Basin, Australija…….……..141
5.1.2. Primjena nove metode na ležištu Montney, Kanada……..153
5.2. Testovi porasta tlaka u VFHB……..……...162
5.2.1. Primjena nove metode na ležištu Changqing, Kina…….…….……..162
5.3. Usporedba novih rezultata s originalnim vrijednostima propusnosti stijene...171
6. DISKUSIJA REZULTATA…….……..175
7. ZAKLJUČCI…….…….…183
8. LITERATURA…….……..188
9. PRILOZI…….……198
Prilog 1: Test porasta tlaka za odabranu VFHB na ležištu Eagle Ford….....198
Prilog 2: Konstruktivne veličine modificiranog Bourdet dijagrama.....201
Prilog 3: Test porasta tlaka za FB na ležištu Perth Basin.....205
Prilog 4: Test porasta tlaka za FB na ležištu Montney.....207
Prilog 5: Test porasta tlaka za VFHB na ležištu Changqing.....209
10. ŽIVOTOPIS…….……...212
11. POPIS RADOVA…….…...216

POPIS SLIKA

Slika 1: Strujnice u poprečnoj i uzdužnoj frakturi horizontalne bušotine.....1
Slika 2: Raspodjela proizvodnje plina prema vrsti ležišta.....2
Slika 3: Vodeće zemlje u proizvodnji plina iz konvencionalni i nekonvencionalnih ležišta...2
Slika 4: Nekonvencionalna ležišta šejlova i pješčenjaka murske, savske i dravske depresije.3
Slika 5: Kumulativna proizvodnja plinske bušotine na ležištu vrlo slabe propusnosti.....4
Slika 6: Vrijeme mjerenja potrebno za postizanje stabilizacije tlaka.....5
Slika 7: Log-log prikaz neustaljenog perioda testa porasta tlaka na tipskoj krivulji i pripadajućoj derivaciji.....6
Slika 8: Analiza testa porasta tlaka Hornerovom metodom.....17
Slika 9: Bezdimenzionalni tlak za bušotinu u neograničenom ležištu, s uključenim efektom skladištenja, C_D, i skin faktorom, s.....18
Slika 10: Bezdimenzionalni tlak, p_D, u funkciji bezdimenzionalne grupe, t_D/C_D.....19
Slika 11: Tipske krivulje za neograničeno ležište s efektom skladištenja, C_D, i skin efektom, s...21
Slika 12: Analiza testa porasta tlaka metodom tipskih krivulja i derivacijom tlaka.....22
Slika 13: Model horizontalne bušotine.....24
Slika 14: Bezdimenzionalni tlak u središtu horizontalne bušotine, smještene u vertikalnom središtu neograničenog ležišta.....25
Slika 15: Rani radijalni protok u ležištu s horizontalnom bušotinom.....26
Slika 16: Rani linearni protok u ležištu s horizontalnom bušotinom.....27
Slika 17: Kasni radijalni protok u ležištu s horizontalnom bušotinom.....28
Slika 18: Ponašanje tlaka i derivacije za horizontalnu bušotinu.....31
Slika 19: Vertikalna pukotina s bušotinom u središtu.....34
Slika 20: Model protjecanja fluida kroz pukotinu.....35
Slika 21: Tipske krivulje za frakturiranu bušotinu u neograničenom ležištu, s konstantnim protokom na unutarnjoj granici ležišta.....36
Slika 22. Odnos bezdimenzionalnog efektivnog radijusa bušotine i bezdimenzionalne vodljivosti vertikalne frakture.....36
Slika 23: Bezdimenzionalni tlak i njegova derivacija u funkciji bezdimenzionalnog vremena za horizontalnu bušotinu presječenu poprečnom pukotinom.....39
Slika 24: Bezdimenzionalni tlak i njegova derivacija u funkciji bezdimenzionalnog vremena za horizontalnu bušotinu presječenu s više poprečnih pukotina osrednje vodljivosti.....41

Slika 25: Bezdimenzionalni tlak i njegova derivacija u funkciji bezdimenzionalnog vremena za horizontalnu bušotinu presječenu s više poprečnih pukotina velike vodljivosti.....42
Slika 26: Bezdimenzionalni efektivni radijus u funkciji bezdimenzionalne duljine horizontalne bušotine presječene s više poprečnih pukotina.....43
Slika 27: Bezdimenzionalni tlak u funkciji omjera bezdimenzionalnog vremena i bezdimenzionalnog radijusa bušotine s poprečnom pukotinom.....44
Slika 28: Simulacija derivacije krivulje tlaka za proizvodni model višestruko frakturirane horizontalne bušotine.....48
Slika 29: Simulacije derivacija krivulja testa porasta tlaka višestruko frakturirane horizontalne bušotine, za t_p = 1000 h i t_p = 40 000 h.....49
Slika 30: Analiza testa porasta tlaka višestruko frakturirane horizontalne bušotine u slabo propusnom ležištu šejla, Eagle Ford.....50
Slika 31: *'History plot'* za test porasta tlaka višestruko frakturirane horizontalne bušotine u slabo propusnom ležištu šejla, Eagle Ford.....50
Slika 32: Oblici protoka višestruko frakturirane horizontalne bušotine.....53
Slika 33: Razvoj 2. derivacije tlaka do radijalnog oblika protoka.....55
Slika 34: Ekstrapolacija 1. i 2. derivacije tlaka za test porasta u slabo propusnom ležištu pješčenjaka, Perth Basin.....56
Slika 35: Propusnost jezgre u odnosu na njenu šupljikavost za slabo propusno ležište pješčenjaka, Perth Basin.....56
Slika 36: Test porasta tlaka frakturirane bušotine u slabo propusnom ležištu pješčenjaka, Perth Basin.....57
Slika 37: Propusnost jezgre u odnosu na njenu šupljikavost za slabo propusno ležište pješčenjaka, Perth Basin.....57
Slika 38: Rani linearni protok u višestruko frakturiranoj horizontalnoj bušotini, prema autoru Houzeu i suradnicima.....61
Slika 39: Pseudo-radijalni protok u višestruko frakturiranoj horizontalnoj bušotini, prema autoru Houzeu i suradnicima.....61
Slika 40: Polu-stacionarni protok u višestruko frakturiranoj horizontalnoj bušotini, prema autoru Houzeu i suradnicima.....62
Slika 41: Ulazni podaci o bušotini i ležištu za program Saphir, Eagle Ford.....63
Slika 42: *'History plot'* za test porasta tlaka u programu Saphir, Eagle Ford.....64
Slika 43: Log-log dijagram analize testa porasta tlaka programom Saphir, Eagle Ford.....65

Slika 44: Rezultati analize testa porasta tlaka programom Saphir, Eagle Ford.....65
Slika 45: Politropski eksponenti i promjene stanja u (T, s)-dijagramu.....68
Slike 46a i b: Nagibi pravaca za oblike protoka i Bourdet log-log dijagram.....68
Slika 47: Odabrani test porasta tlaka za razvoj metode, ležište Eagle Ford.....72
Slika 48: Usporedba utjecaja četiri parametra ordinate na oblik krivulje testa porasta.....76
Slika 49: Početne točke na krivulji porasta tlaka.....78
Slika 50: Period skladištenja i odabrane točke na krivulji porasta za razvoj metode.....80
Slika 51: Određivanje nagiba pravaca od točke A do odabranih točaka na krivulji porasta..83
Slika 52: Linearna aproksimacija za nagibe pravaca iz točke A.....84
Slika 53: Lin-lin dijagram i početni tlak, p_i, određen pomoću nagiba pravaca iz točke A..86
Slika 54: Određivanje nagiba pravaca od točke B do odabranih točaka na krivulji porasta..87
Slika 55: Linearna aproksimacija za nagibe pravaca iz točke B.....88
Slika 56: Lin-lin dijagram i početni tlak, p_i, određen pomoću nagiba pravaca iz točke B..89
Slika 57: Određivanje nagiba pravaca od točke C do odabranih točaka na krivulji porasta..91
Slika 58: Linearna aproksimacija za nagibe pravaca iz točke C.....92
Slika 59: Lin-lin dijagram i početni tlak, p_i, određen pomoću nagiba pravaca iz točke C..93
Slika 60: Podjela nepoznatog područja trajanja testa porasta tlaka na prividno i stvarno...95
Slika 61: Postavljanje točki 9', 9'' i 9''' za ekstrapolaciju na krivulju porasta.....96
Slika 62: Približno postavljene točke za ekstrapolaciju na krivulji porasta.....97
Slika 63: Stvarna pozicija točke 9' za ekstrapolaciju krivulje porasta.....101
Slika 64: Stvarna pozicija točke 9'' za ekstrapolaciju krivulje porasta.....102
Slika 65: Stvarna pozicija točke 9''' za ekstrapolaciju krivulje porasta.....102
Slika 66: Trajanje testa, Δt, i pomoćni parametar, X, za broj retka mjerenja testa porasta..104
Slika 67: Pomoćni (X, Δp) polu-logaritamski dijagram.....104
Slika 68: Trajanje testa, Δt, i parametar broja retka, X, do ekstrapolirane točke mjerenja 9'''...106
Slika 69: Trajanje testa, Δt, i broj retka testa, X, za slučaj dodane nulte točke mjerenja..107
Slika 70: Pomoćni (X, Δt) log-log dijagram.....107
Slika 71: Pomoćni (X, Δp) i (Δt, Δp) polu-log dijagrami za ekstrapolaciju krivulje porasta.....108
Slika 72: Segmenti trajanja testa za ekstrapolaciju krivulje porasta tlaka do točke 9'.....110
Slika 73: Optimiranje ekstrapolacije krivulje porasta do točke 9'.....112
Slika 74: Usporedba točnosti aproksimacija krivulje porasta za segmente trajanja do 9'....112
Slika 75: Segmenti trajanja testa za ekstrapolaciju krivulje porasta tlaka do točke 9''.....115
Slika 76: Optimalno ekstrapolirana krivulja porasta do točke 9''.....116

Slika 77: Segmenti trajanja testa za ekstrapolaciju krivulje porasta tlaka do točke 9'''.....117
Slika 78: Usporedba točnosti aproksimacija krivulje porasta za segmente trajanja do 9'''..117
Slika 79: Optimalno ekstrapolirana krivulja porasta do točke 9'''.....118
Slika 80: Derivacija krivulje porasta do točke 9' prikazana do točke 3.....122
Slika 81: Derivacija krivulje testa porasta tlaka do točke 9'.....122
Slika 82: Derivacija krivulje testa porasta tlaka do točke 9".....123
Slika 83: Derivacija krivulje testa porasta tlaka do točke 9''' prikazana do točke 9".....125
Slika 84: Derivacija krivulje testa porasta tlaka do točke 9'''.....125
Slika 85: Modificirani Bourdet log-log dijagram za slabo propusna ležišta.....132
Slika 86: Test porasta tlaka i derivacija tlaka odabrane bušotine za razvoj nove metode....133
Slika 87: Preklapanja modificiranog dijagrama s analiziranim testom VFHB, ležište Eagle Ford.....134
Slika 88: Konačan oblik analize 1. testa porasta VFHB za preklapanje s Bourdet dijagramom..135
Slika 89: Ulazni podaci o bušotini i ležištu za primjenu nove metode u programu Saphir s pomoću efektivnog radijusa bušotine, ležište Eagle Ford.....138
Slika 90: *'History plot'* testa porasta tlaka za primjenu nove metode u programu Saphir s pomoću modificiranih parametara protoka, q_p, i vremena, t_p, ležište Eagle Ford.....138
Slika 91: Log-log dijagram analize testa porasta tlaka za primjenu nove metode u programu Saphir do krajnje ekstrapoliranog tlaka, ležište Eagle Ford.....140
Slika 92: Rezultati analize testa porasta tlaka primjenom nove metode za određivanje propusnosti u programu Saphir, ležište Eagle Ford.....140
Slika 93: Nagibi pravaca od točke A do odabranih točaka na krivulji porasta, ležište Perth Basin.....144
Slika 94: Nagibi pravaca u odnosu na razliku kvadrata tlakova, ležište Perth Basin.....145
Slika 95: Segmenti za optimalnu ekstrapolaciju krivulje porasta tlaka, ležište Perth Basin..147
Slika 96: Derivacija ekstrapolirane krivulje testa porasta tlaka, ležište Perth Basin.....149
Slika 97: Preklapanja modificiranog dijagrama s analiziranim testom FB, ležište Perth Basin.....150
Slika 98: Konačan oblik analize 2. testa porasta FB za preklapanje s Bourdet dijagramom..151
Slika 99: Log-log dijagram i rezultati analize testa porasta tlaka u programu Saphir, ležište Perth Basin.....153
Slika 100: Nagibi pravaca od točke A do odabranih točaka na krivulji porasta, ležište Montney.....155
Slika 101: Nagibi pravaca u odnosu na razliku kvadrata tlakova, ležište Montney.....156
Slika 102: Segmenti za optimalnu ekstrapolaciju krivulje porasta tlaka, ležište Montney..157

Slika 103: Derivacija ekstrapolirane krivulje testa porasta tlaka, ležište Montney.....158
Slika 104: Preklapanja modificiranog dijagrama s analiziranim testom FB, ležište Montney....159
Slika 105: Konačan oblik analize 3. testa porasta FB za preklapanje s Bourdet dijagramom.....160
Slika 106: Log-log dijagram i rezultati analize testa porasta tlaka u programu Saphir, ležište Montney.....161
Slika 107: Nagibi pravaca od točke A do odabranih točaka na krivulji porasta, ležište Changqing.....164
Slika 108: Nagibi pravaca u odnosu na razliku kvadrata tlakova, ležište Changqing.....165
Slika 109: Segmenti za optimalnu ekstrapolaciju krivulje porasta tlaka, ležište Changqing.....166
Slika 110: Derivacija ekstrapolirane krivulje testa porasta tlaka, ležište Changqing.....167
Slika 111: Preklapanja modificiranog dijagrama s analiziranim testom VFHB, ležište Changqing.....168
Slika 112: Konačan oblik analize 4. testa porasta VFHB za preklapanje s Bourdet dijagramom.....169
Slika 113: Log-log dijagram i rezultati analize testa porasta tlaka u programu Saphir, ležište Changqing.....171
Slika 114: Rezultati preklapanja dijagrama za 4 testa porasta i izračunate propusnosti stijene...172
Slika 115: Ključni koraci nove metodologije za određivanje propusnosti stijene optimiranjem trajanja testa porasta tlaka, u plinskim bušotinama slabo propusnih ležišta..174

POPIS TABLICA

Tablica 1: Minimalno vrijeme potrebno za početak pseudo-radijalnog protoka u frakturiranoj bušotini.....37
Tablica 2: Osnovna svojstva ležišta Eagle Ford, bušotine i 1. testa porasta tlaka.....71
Tablica 3: Početni i krajnji tlak testa porasta za četiri različite ordinate na slici 48…….....75
Tablica 4: Odabir ključnih točaka na krivulji porasta tlaka.....78
Tablica 5: Ključne točke na krivulji testa porasta tlaka za razvoj metode.....79
Tablica 6: Odabrane točke na krivulji porasta za razvoj metode.....80
Tablica 7: Očitani nagibi pravaca od točke A do odabranih točaka na krivulji porasta.....83
Tablica 8: Modelirani parametri linearnih jednadžbi sa slike 13.....86
Tablica 9: Očitani nagibi pravaca od točke B do odabranih točaka na krivulji porasta.....88
Tablica 10: Modelirani parametri linearnih jednadžbi sa slike 16.....89
Tablica 11: Očitani nagibi pravaca od točke C do odabranih točaka na krivulji porasta.....91
Tablica 12: Modelirani parametri linearnih jednadžbi sa slike 19.....93
Tablica 13: Točke za ekstrapolaciju na krivulji porasta.....97
Tablica 14: Rezultati vremena trajanja testa za ekstrapolaciju krivulje porasta.....99
Tablica 15: Rezultati svih vremena za ekstrapolaciju krivulje porasta.....99
Tablica 16: Trajanje testa, Δt, i pridruženi parametar, X, za broj retka točke mjerenja testa.....103
Tablica 17: Trajanje testa, Δt, i pridruženi parametar, X, do ekstrapolirane točke mjerenja 9'''.....105
Tablica 18: Trajanje testa, Δt, i pridruženi parametar, X, za dodanu nultu točku mjerenja..106
Tablica 19: Trajanje testa, Δt, i parametar, X, bez nulte točke do svih ekstrapoliranih točaka..108
Tablica 20: Odabir optimalne aproksimacije pojedinog segmenta do točke krivulje 9'.....110
Tablica 21: Podaci za cjelovitu ekstrapoliranu krivulju testa porasta do točke 9'.....113
Tablica 22: Podaci za cjelovitu ekstrapoliranu krivulju testa porasta do točke 9''.....115
Tablica 23: Podaci za cjelovitu ekstrapoliranu krivulju testa porasta do točke 9'''.....118
Tablica 24: Rezultat ekstrapolacije za krajnju točku krivulje testa porasta tlaka.....126
Tablica 25: Testovi porasta tlaka za primjenu nove metode.....141
Tablica 26: Osnovna svojstva ležišta Perth Basin, bušotine i 2. testa porasta tlaka.....142
Tablica 27: Test porasta tlaka, ležište Perth Basin.....142
Tablica 28: Izračun razlike kvadrata tlakova za pojedine nagibe, m_i, ležište Perth Basin..146
Tablica 29: Izračun iznosa potencije, n, i vremena trajanja testa porasta, Δt, za pojedine tlakove, ležište Perth Basin.....146

Tablica 30: Optimalna ekstrapolacija krivulje porasta tlaka, ležište Perth Basin.....148
Tablica 31: Osnovna svojstva ležišta Montney, bušotine i 3. testa porasta tlaka.....154
Tablica 32: Test porasta tlaka, ležište Montney.....155
Tablica 33: Izračun razlike kvadrata tlakova za pojedine nagibe, m_i, ležište Montney.....156
Tablica 34: Izračun iznosa potencije, *n*, i vremena trajanja testa porasta, Δt, za pojedine tlakove, ležište Montney.....156
Tablica 35: Optimalna ekstrapolacija krivulje porasta tlaka, ležište Montney.....158
Tablica 36: Osnovna svojstva ležišta Changqing, bušotine i 4. testa porasta tlaka.....162
Tablica 37: Test porasta tlaka, ležište Changqing.....163
Tablica 38: Izračun razlike kvadrata tlakova za pojedine nagibe, m_i, ležište Changqing....165
Tablica 39: Izračun iznosa potencije, *n*, i vremena trajanja testa porasta, Δt, za pojedine tlakove, ležište Changqing.....165
Tablica 40: Optimalna ekstrapolacija krivulje porasta tlaka, ležište Changqing.....167
Tablica 41: Usporedba novih i originalnih vrijednosti propusnosti stijene.....172
Tablica 42: Usporedba rezultata nove metode s primjenom metode u programu Saphir....173

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

A (m^2) - površina prostiranja ležišta

B (m^3/m^3) - obujamski koeficijent

C (m^3/Pa) - konstanta skladištenja bušotine

C_A (-) - faktor oblika površine crpljenja bušotine

C_D (-) - bezdimenzionalni koeficijent skladištenja bušotine

C_{fD} (-) - bezdimenzionalna vodljivost pukotine

c_f (Pa^{-1}) - stlačivost ležišne stijene

c_t (Pa^{-1}) - ukupna stlačivost ležišta

d (m) - unutarnji promjer

f_1, f_2 (-) - faktori u modeliranim jednadžbama za određivanje nagiba pravaca

G (m^3) - ukupno otkrivena količina plina u ležištu

g (m/s^2) - gravitacija

h (m) - efektivna debljina ležišta

h_D (-) - bezdimenzionalna debljina ležišta

h_f (m) - visina pukotine

K_1, K_2 (-) - konstante u modificiranim jednadžbama za određivanje propusnosti

k (m^2) - apsolutna propusnost ležišne stijene

k_f (m^2) - propusnost hidraulički stvorene pukotine

k_H (m^2) - horizontalna propusnost ležišne stijene

k_s (m^2) - promijenjena propusnost stijene u pribušotinskoj zoni

k_V (m^2) - vertikalna propusnost ležišne stijene

k_z (m^2) - propusnost ležišne stijene u smjeru osi z

k_x (m^2) - propusnost ležišne stijene u smjeru osi x

k_y (m^2) - propusnost ležišne stijene u smjeru osi y

L (m) - duljina horizontalne bušotine

m (Pa) - nagib pravocrtnog dijela krivulje tlaka u polu-logaritamskom mjerilu

$m(p)$ (Pa/s) - funkcija pseudo-tlaka

n (-) - potencija u jednadžbi za određivanje nagiba pravaca u log-log dijagramu

N (-) - broj pukotina uzduž horizontalnog kanala bušotine

p (Pa) - tlak

p_b (Pa) - tlak zasićenja

p_D (-) - bezdimenzionalni tlak

p_e (Pa) - tlak na radijusu (granici) crpljenja bušotine

p_{fD} (-) - bezdimenzionalni tlak u pukotini

p_i (Pa) - početni ležišni tlak

p_{rD} (-) - bezdimenzionalni tlak u ležištu

p_{sc} (Pa) - standardni tlak

p_{wf} (Pa) - dinamički tlak u bušotini na razini ležišta

p_{wh} (Pa) - dinamički tlak na ušću bušotine

p_{ws} (Pa) - statički tlak u bušotini na razini ležišta

p^* (Pa) - ekstrapolirani ležišni tlak

Q (m^3) - kumulativna proizvodnja nafte ili plina

Q_D (-) - bezdimenzionalna kumulativna proizvodnja

q (m^3/s) - obujamski protok (trenutačna proizvodnja)

q_D (-) - bezdimenzionalni obujamski protok

R_s (m^3/m^3) - faktor otopljenog plina u nafti (plinski faktor)

r (m) - radijus

r_D (-) - bezdimenzionalni radijus

r_e (m) - radijus crpljenja bušotine, radijus vanjske granice ležišta

r_{eD} (-) - bezdimenzionalni radijus crpljenja bušotine

r_e (m) - radijus crpljenja bušotine, radijus vanjske granice ležišta

r_f (m) - radijus poprječne pukotine kružnog oblika

r_w (m) - radijus bušotine, radijus unutarnje granice ležišta

r_{wD} (-) - bezdimenzionalni radijus bušotine

r'_w (m) - efektivni radijus bušotine

S (-) - zasićenje

s (-) - skin faktor zbog promijenjene propusnosti u pribušotinskoj zoni

s_z (-) - skin faktor zbog nepotpunog raskrivanja ležišta horizontalnom

T (K) - temperatura

T_R (K) - ležišna temperatura

T_{SC} (K) - standardna temperatura

t (s) - vrijeme

t_p (s) - proizvodno vrijeme

t_D (-) - bezdimenzionalno vrijeme

t_{Dxf} (-) - bezdimenzionalno vrijeme u funkciji duljine pukotine

t_{wbs} (s) - vrijeme kraja djelovanja efekta skladištenja fluida u bušotini

V (m^3) - obujam

v (m^3/s) - brzina

w (m) - širina pukotine

x_f (m) - poluduljina pukotine

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

y (-) - potencija u modificiranoj jednadžbi za određivanje propusnosti

β (-) - indeks anizotropije horizontalne i vertikalne propusnosti

γ (-) - relativna gustoća fluida

Δp (Pa) - razlika tlaka (ili kvadrata tlakova)

Δp_s (Pa) - pad tlaka radi skin faktora

Δt (s) - vrijeme testa porasta tlaka

μ (Pa·s) - dinamička viskoznost fluida

ρ (kg/m^3) - obujamska masa, gustoća

ϕ (dio) - efektivna šupljikavost ležišne stijene

Indeksi:

f - pukotina (od engl. *fracture*)

g - plin (od engl. *gas*)

i - početni uvjeti (od engl. *initial*)

l - kapljevina (od engl. *liquid*)

o - nafta (od engl. *oil*)

p - pora, šupljina

r - stijena (od engl. *rock*)

t	- ukupno (od engl. *total*)
wb	- bušotina (od engl. *wellbore*)

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

AAPG - Američko udruženje naftnih geologa (engl. *American Association of Petroleum Geologists*)

FB - frakturirana bušotina

IEA - Međunarodna agencija za energiju (engl. *International Energy Agency*)

IPM - Proizvodno modeliranje bušotina (engl. *Integrated Production Modelling*)

OECD - Organizacija za ekonomsku suradnju i razvoj (engl. *Organisation for Economic Cooperation and Development*)

PTA - Analiza prijelaznog perioda porasta tlaka (engl. *Pressure Transient Analysis*)

RTA - Analiza prijelaznog perioda protoka fluida (engl. *Rate Transient Analysis*)

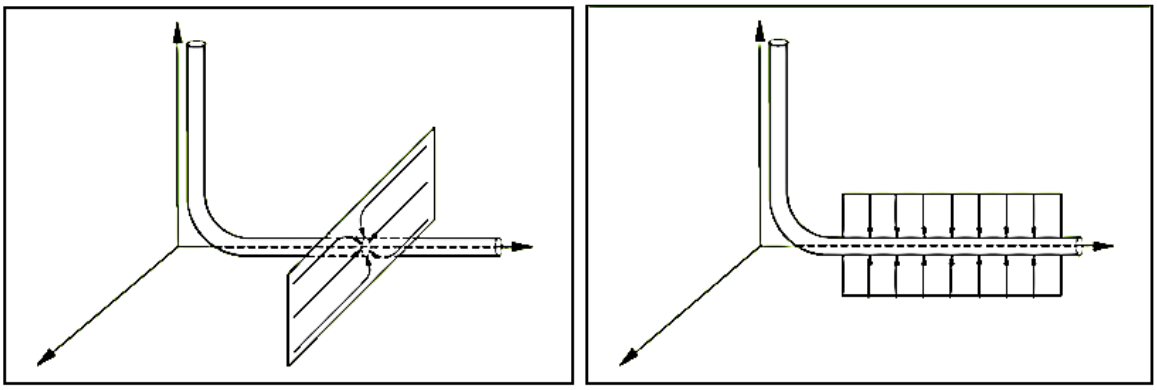
SPE - Udruga naftnih inženjera (engl. *Society of Petroleum Engineers*)

VFHB - višestruko frakturirana horizontalna bušotina

WPC - Svjetski naftni kongres (engl. *World Petroleum Congress*)

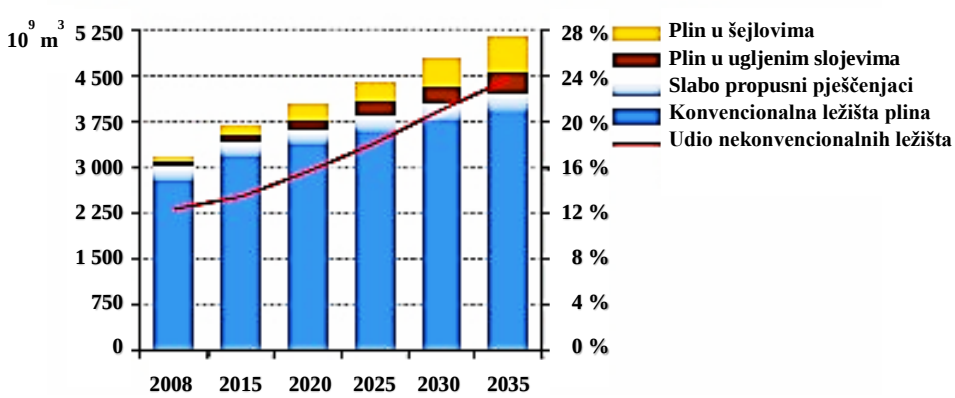
1. UVOD

Nekonvencionalna ležišta nafte i plina mogu se kategorizirati u nekoliko skupina, prema fizikalnim karakteristikama stijena i fluida. To su: slabo propusna ležišta, ležišta nafte i plina u šejlovima, ležišta viskozne nafte, plin (metan) u ugljenim slojevima i plinski hidrati. Prema konceptu 'trokuta resursa' o distribuciji neobnovljivih prirodnih sirovina, potencijal nekonvencionalnih ležišta ugljikovodika je veći od dokazanih svjetskih rezervi nafte i plina u konvencionalnim ležištima. Krovne naftne udruge u svijetu (SPE, AAPG, WPC i dr.) prihvatile su zajedničku definiciju nekonvencionalnih ležišta, koja glasi da naftu i plin iz ovakvih ležišta nije moguće crpiti pri ekonomičnom protoku niti u ekonomičnim količinama, ako se bušotinu ne stimulira hidrauličkim frakturiranjem, horizontalnom ili višestruko frakturiranim bušotinama, kako bi se povećala kontaktna površina između ležišta i bušotine (slika 1).



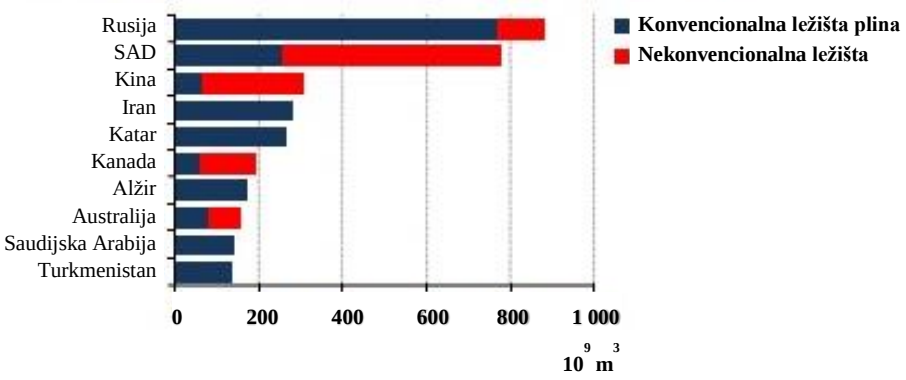
Slika 1: Strujnice u poprečnoj i uzdužnoj frakturi horizontalne bušotine (Bahrami et al., 2012a)

Ukupne dokazane rezerve plina su u 2015. godine iznosile oko 200×10^{12} m^3, dok su pridobive rezerve nekonvencionalnih ležišta plina procijenjene na više od 400×10^{12} m^3, što uključuje plin iz slabo propusnih pješčenjaka i šejlova (engl. *tight gas sand & shale gas*), kao i metan iz ugljena (engl. *coalbed methane*). Svjetska proizvodnja plina iste godine bila je približno $3\ 750\times10^9$ m^3 s udjelom proizvodnje iz nekonvencionalnih ležišta od oko 14%, koji bi se prema predviđanju Međunarodne agencije za energiju (IEA) do 2035. godine mogao povećati i na 24% (slika 2).



Slika 2: Raspodjela proizvodnje plina prema vrsti ležišta (OECD/IEA, 2011)

U posljednjih 20 godina akumuliran je velik broj informacija širom svijeta o nekonvencionalnim ležištima nafte i plina i o tehnologiji koja je omogućila njihov razvoj. Nekonvencionalna ležišta otkrivena su u mnogim područjima. Najintenzivnije se istražuju slabo propusni pješčenjaci i šejlovi, posebno u SAD-u i Kanadi, ali i u Kini, Rusiji i Australiji, gdje plin iz takvih ležišta značajno sudjeluje u proizvodnji (Dong et al., 2013; EIA/ARI, 2013; Dong et al., 2011). Stoga su istraživanja u doktorskom radu vezana za određivanje propusnosti stijene većinom provedena na podacima testova porasta tlaka u bušotinama ovih ležišta (slika 3).



Slika 3: Vodeće zemlje u proizvodnji plina iz konvencionalnih i nekonvencionalnih ležišta (OECD/IEA, 2011)

U Hrvatskoj su istražnim radovima u područjima savske, dravske i murske depresije utvrđena ležišta prirodnog plina nekonvencionalnih karakteristika, koja obuhvaćaju četiri šejla i sedam pješčenjaka, označenih narančastim i žutim točkama na karti slike 4. Navedene

depresije nalaze se u sjevernom i istočnom dijelu Republike Hrvatske, a čine ih naslage stijena neogenske i kvartarne starosti (Malvić, 2015; Malvić i Cvetković, 2013; Malvić i Majstorović, 2012). Najveći broj ovih ležišta plina nalazi se u području Bilogorske subdepresije.



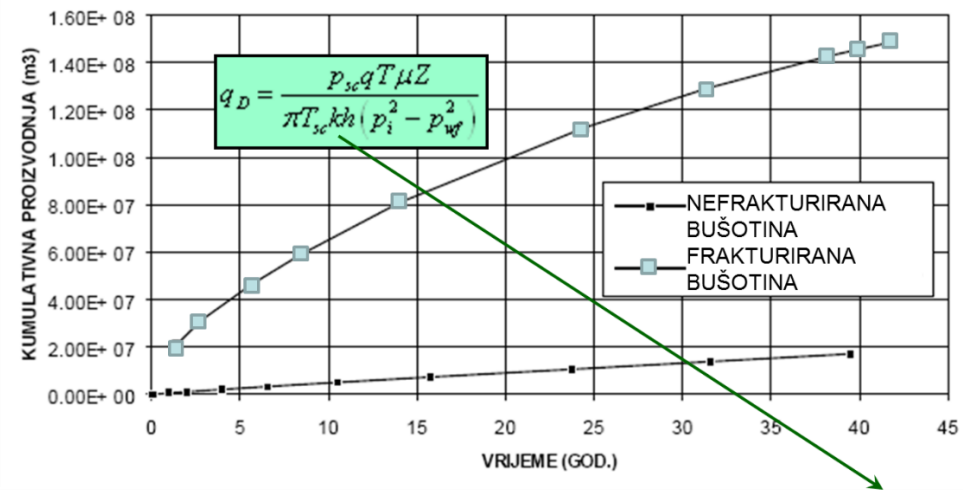
Slika 4: Nekonvencionalna ležišta šejlova i pješčenjaka murske, savske i dravske depresije (Malvić, 2015; Malvić i Cvetković, 2013; Malvić i Majstorović, 2012)

S obzirom na starost domaćih naftnih i plinskih polja i stalan pad proizvodnje nafte i prirodnog plina, a u isto vrijeme sve veći rast potražnje za energijom, Hrvatska je sve više suočena s problemom zadovoljavanja domaćih energetski potreba. Premda hrvatsko naftno-plinsko gospodarstvo očekuje povećanje rezervi ugljikovodika uglavnom od novootkrivenih konvencionalnih ležišta, veća otkrića su u prethodnom periodu izostala. U zadnja tri desetljeća, u Hrvatskoj je manje od polovine iscrpljenih rezervi nafte, kondenzata i plina nadomješteno novootkrivenim rezervama, dok se ostatak donekle nadomještao uvođenjem metoda za povećanje iscrpka naftnih ležišta. Kako je riječ o metodama primjenjivim uglavnom u konvencionalnim ležištima, dugoročno rješenje bi trebalo potražiti u nekonvencionalnim ležištima plina. Na RGN fakultetu Sveučilišta u Zagrebu su sukladno europskoj energetskoj politici izrađene smjernice za izradu zakonske regulative kojom bi se

u Hrvatskoj omogućila eksploatacija plina iz nekonvencionalnih ležišta i potaknuo razvoj proizvodnje iz takvih tipova ležišta (Karasalihović Sedlar et al., 2014).

Slabo propusno ležište plina klasificirano je kao ležište čija je propusnost, k, niža od 0,1 mD ($0{,}1\times10^{-3}$ μm^2 = 0,1 x 10^{-15} m^2), iako propusnost nije jedini pokazatelj ležišta koje se može karakterizirati kao slabo propusno, jer protok do bušotine ovisi i o ostalim ležišnim karakteristikama, poput efektivne debljine, h_e, početnog tlaka, p_i ili karakteristika pornih kanala, koje se očituju na krivuljama kapilarnog tlaka (Wheaton, 2017; Singh et al., 2014; Sakhaee-Pour i Bryant, 2012). U slučaju kada se protok odvija kroz kapilare takvog efektivnog radijusa da kapilarne sile postaju značajan čimbenik u ukupnom protoku plina, jednadžbe difuzije razvijene za konvencionalna ležišta neće biti potpuno utemeljene (Murickan et al., 2012; Economides i Nolte, 2000), a time posljedično ni upotreba komercijalnih i široko korištenih interpretacijskih softvera za analizu testa porasta tlaka (KAPPA-Saphir) i za primjenu proizvodnih modela bušotina (IPM-Prosper).

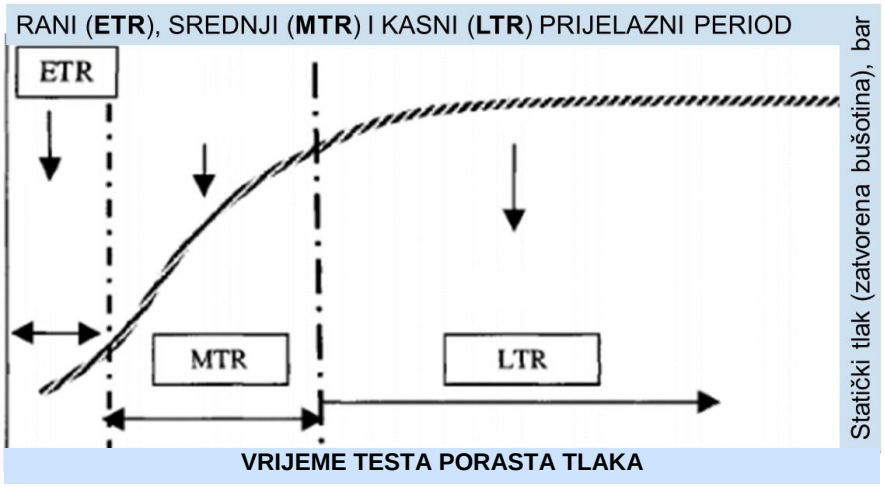
Prognoziranje proizvodnje plina, q_g, iz slabo propusnih ležišta temelji se na proizvodnim modelima za pritjecanje fluida iz ležišta u bušotinu kroz vertikalnu pukotinu, koji se analogno primjenjuju na višestruko frakturirane horizontalne bušotine (Čikeš, 2015; Bingxiang, et al., 2012; Chen et al., 1997). Međutim, na točnost prognoziranja (slika 5) najviše utječe procjena ključnih parametara koji se unose u proizvodni model bušotine, kao što je propusnost ležišne stijene, k.



Slika 5: Kumulativna proizvodnja plinske bušotine na ležištu slabe propusnosti, k = 0,005 mD

U plinskim bušotinama slabo propusnih ležišta dolazi do odstupanja u određivanju propusnosti stijene, k, jer standardna metoda neograničeno djelujućeg radijalnog protoka

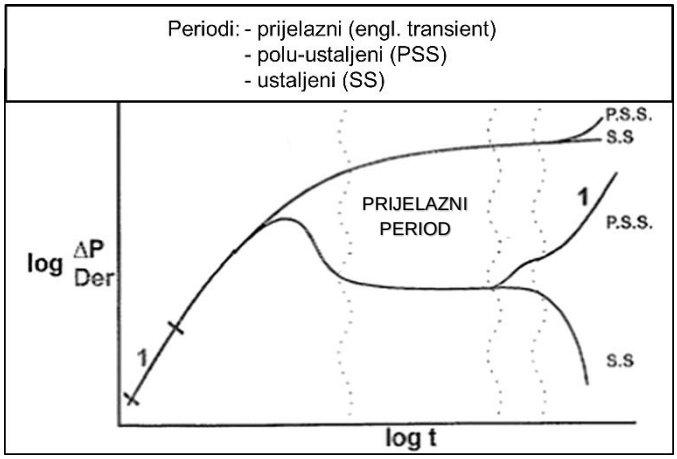
(engl. *infinite acting radial flow*) nije uvijek primjenjiva, niti u fazi ispitivanja u bušotini prije frakturiranja (engl. *pre-frac testing*), niti u fazi mjerenja tlaka stimulirane bušotine (engl. *post-frac testing*). Prema analizi efekta skladištenja fluida u bušotini (engl. *wellbore storage effect*), vrijeme uspostave neograničeno djelujućeg radijalnog protoka u slabo propusnim ležištima može biti vrlo dugo, pa se metode analiziranja slabo propusnih plinskih ležišta se i dalje istražuju i usavršavaju (Buhidma et al., 2013; Gringarten, 2012; Igbokyi i Tiab, 2010; Jahanbani i Aguilera, 2009; Garcia et al., 2006). U konvencionalnim ležištima koja se kategoriziraju kao srednje ili dobro propusna, prosječno trajanje uspostave neograničeno djelujućeg radijalnog protoka, a time i trajanje testa porasta tlaka, može biti od jednog do tri dana, što također ovisi i o fizikalnim karakteristikama ležišta i bušotine (Kuchuk, 2015; Awontunde i Horne, 2011; Holditch, 2006). U nekonvencionalnim plinskim ležištima pješčenjaka i šejlova, bi za pouzdanu interpretaciju testova porasta tlaka analogno trebalo doći do stabilizacije tlaka tj. uspostave tzv. pseudo-radijalnog oblika protoka u stimuliranim bušotinama (slika 6). Stoga bi kod plinskih ležišta slabe do ekstremno slabe propusnosti (0,1 do 0,001 mD = 0,1 do 0,001 x 10^{-15} m^2), ovisno o prosječnim vrijednostima fizikalnih pokazatelja ležišta i bušotine, mjerenje testa porasta tlaka za pouzdano određivanje propusnosti trebalo trajati i nekoliko godina (DDA book, 2017).



Slika 6: Vrijeme mjerenja potrebno za postizanje stabilizacije tlaka (Yasin, 2012)

S obzirom na problem predugog trajanja testa porasta tlaka, osnovni pristup rješavanja u doktorskom radu, je detaljnije tumačenje testa u svim područjima prijelaznog perioda ispitivanja, od ranog, srednjeg do kasnog (slike 6 i 7). Istraživanja vezana za

određivanje propusnosti slabo propusnih ležišta analizom testova porasta tlaka provedena su na podacima hidraulički frakturiranih i višestruko frakturiranih horizontalnih bušotina u pješčenjacima i šejlovima. U grupi nekonvencionalnih ležišta plina u pješčenjacima obrađena su ležišta Perth Basin u zapadnoj Australiji, Montney u Kanadi i Changqing u Kini, a istraživanja u šejlovima su provedena na ležištu Eagle Ford u Texasu.



Slika 7: Log-log prikaz prijelaznog (engl. *transient*), polu-ustaljenog (engl. *pseudo-steady state*) i ustaljenog (engl. *steady state*) perioda testa porasta na tipskoj krivulji i derivaciji tlaka (Yasin, 2012)

Novim pristupima u rješavanju nepotpunih testova porasta tlaka u stimuliranim bušotinama u kojima nije postignut pseudo-radijalni protok bave se mnogi autori (DDA book, 2017; Lougheed et al., 2013; Bahrami et al., 2013;). Iako su proizvodni modeli protjecanja ugljikovodika u konvencionalnim i nekonvencionalnim ležištima ključni u proračunu parametara bušotine, kao što su protok, q, i dinamički tlak u funkciji vremena, p_{wf}, njihova metodologija neizostavna je i u analizi testova porasta tlaka za određivanje propusnosti ležišne stijene, k. Analiza testa porasta tlaka temelji se na poznatim rješenjima jednadžbe difuzije za neustaljeno ili prijelazno stanje radijalnog protoka fluida, koje je opisano modelom neograničenog ležišta s konstantnim protokom u bušotini (Economides i Nolte, 2000). Analognim postupcima se u novijim literaturnim izvorima izvode rješenja za analizu testa porasta tlaka u bušotinama nekonvencionalnih ležišta (Volz et al., 2013; Yuan et al., 2013; Umberto i Borges, 2009), ali nije pronađeno jedinstveno pravilo za interpretaciju prekratkih testova, kojim bi se interpretirao prijelazni period na krivulji tlaka i njenoj derivaciji (slika 5).

Stoga je cilj doktorskog rada razviti novu metodu za analizu testa porasta tlaka u slabo propusnim plinskim ležištima čija primjena bi bila jedinstvena na svim tipovima bušotina tj. na testovima porasta svih slabo propusnih plinskih ležišta, bez potrebe za dugim periodom mjerenja. Cilj rada je također, putem ove metode odrediti utjecaj trajanja testa porasta tlaka na pouzdanu procjenu propusnosti ležišne stijene. To znači da je potrebno odrediti optimalno vrijeme trajanja testa porasta tlaka, s pomoću kojeg bi odstupanja rezultata analize bila minimalna. Osim toga, cilj rada je i utvrditi granice trajanja testa porasta tlaka, odnosno perioda nakon zatvaranja bušotine u kojem interpretacija rezultata testa postojećim metodama nije pouzdana.

Glavna hipoteza rada je da se analizom testa porasta tlaka može pouzdanu procijeniti propusnost stijene. Razvojem nove metode je krivulja testa porasta tlaka optimalno ekstrapolirana sve do krajnjeg slučaja u kojem bi test trajao do potpunog izjednačavanja tlaka u slabo propusnom ležištu. S obzirom na ovu činjenicu, u radu je također dokazana i hipoteza da se analizom testa porasta tlaka, trajanje ispitivanja u bušotinama slabo propusnih ležišta može minimizirati na svega četiri dana ili približno 100 sati, a da određivanje propusnosti bude pouzdano. Ekstrapoliranjem krivulje porasta i njene derivacije je dokazano u kojem vremenu bi nastupio pseudo-radijalni protok u bušotini, čime je omogućena prilagodba postojećih metoda za analizu testa porasta tlaka. Time je također dokazana hipoteza rada da se konvencionalne metode za analizu testa porasta mogu prilagoditi za primjenu u nekonvencionalnim ležištima plina u svrhu određivanja optimalnog trajanja ispitivanja bušotine za postizanje prihvatljivih odstupanja u određivanju propusnosti stijene.

Znanstveni doprinos rada je razvoj cjelokupne metode za određivanje vremena trajanja testa porasta tlaka u plinskim bušotinama slabo propusnih ležišta, koja se sastoji od nekoliko koraka, a može se podijeliti u dva ključna dijela. U prvom dijelu se, temeljem minimalnog tj. četverodnevnog mjerenja, kroz šest ključnih koraka ekstrapolira krivulju i njenu derivaciju do utvrđivanja pojave oblika pseudo-radijalnog protoka. Time je omogućena primjena drugog dijela metode, koji se sastoji od tri koraka. Najprije se modificira Bourdet log-log dijagram za primjenu u slabo propusnim ležištima i jednadžbe za određivanje propusnosti u višestruko frakturiranim horizontalnim bušotinama i u frakturiranim bušotinama. Kao krajnji korak je, putem efektivnog radijusa bušotine i prilagođenih ulaznih jednadžbi za vrijeme i protok, metoda dodatno razvijena i za primjenu u programu Saphir. Minimalno trajanje testa porasta tlaka slabo propusnih ležišta, kao znanstveni doprinos i rezultat istraživanja, značajno će doprinijeti točnosti primjene proizvodnih modela. Osim toga, minimalno trajanje testa doprinijet će i kvalitetnijoj procjeni

ekonomske isplativosti cjelokupnog ciklusa proizvodnje plina, što je također znanstveni doprinos rada. Aplikativni doprinos je što smanjenjem vremena ispitivanja omogućuje i veći broj testiranja slabo propusnih ležišta.

2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA METODA ZA ANALIZU TESTA PORASTA TLAKA

S obzirom na metodologiju za određivanje propusnosti stijene analizom testa porasta tlaka, u doktorskom radu su obrađene stimulirane plinske bušotine u ležištima šejlova (engl. *shale gas*) i pješčenjaka (engl. *tight gas sand*). Poznato je da naftu i plin, prema definiciji nekonvencionalnih ležišta, nije moguće crpiti pri ekonomičnom protoku, ako se bušotinu ne stimulira. Stoga su istraživanja vezana za određivanje propusnosti slabo propusnih plinskih ležišta provedena na podacima hidraulički frakturiranih i višestruko frakturiranih horizontalnih bušotina. Mjerenje porasta tlaka se izvodi zatvaranjem bušotine nakon što je ona proizvodila konstantnim protokom neko vrijeme. Tlak se mjeri odmah prije zatvaranja i bilježi kao funkcija vremena tijekom kojeg je bušotina zatvorena. Intervali bilježenja tlaka kod nekih testova porasta mogu biti čak i svakih 15 sekundi prvih nekoliko minuta nakon zatvaranja bušotine. Kako test napreduje, tako se i interval mjerenja podataka povećava.

Slabo propusno ležište plina klasificirano je kao ležište čija je propusnost, k, niža od 0,1 mD ($0{,}1\times10^{-3}$ μm^2 = $0{,}1\times10^{-15}$ m^2), a prognoziranje proizvodnje plina, q_g, iz ovakvih ležišta temelji se na proizvodnim modelima za pritjecanje fluida iz ležišta u pojedini tip stimulirane bušotine (Sierra et al., 2013). Na točnost prognoziranja utječe i procjena ključnih parametara, kao što je propusnost ležišne stijene, k. Pouzdanost određivanja propusnosti ovisi o analizi testa porasta tlaka stimuliranih bušotina, a metode analiziranja slabo propusnih ležišta se i dalje istražuju i usavršavaju (Volz et al., 2013; Ostojić et al., 2011). U plinskim bušotinama slabo propusnih ležišta dolazi do odstupanja u određivanju propusnosti stijene, k, jer standardna metoda neograničeno djelujućeg radijalnog protoka nije uvijek primjenjiva. Iako su modeli protjecanja fluida u konvencionalnim i nekonvencionalnim ležištima nafte i plina ključni u proračunu proizvodnih parametara pojedinih bušotina, kao što su protok, q, ili dinamički tlak u funkciji vremena, p_{wf}, njihova primjena neizostavna je i u analizi testova porasta tlaka u svim ležištima. U analizi testa porasta modeli služe u određivanju ležišnih karakteristika, prvenstveno za propusnost ležišne stijene, k, i skin faktora, s, a temelje se na izmjerenim proizvodnim parametrima i poznatim svojstvima ležišta i bušotine (Spivey i Lee, 2013; Hategan i Hawkes, 2007; Bourdarot, 1998).

U svrhu pouzdane primjene metode za test porasta tlaka u slabo propusnom ležištu, prvenstveno je potrebno poznavati metodologiju analize proizvodnih testova u konvencionalnim ležištima. Ona se najprije prilagođava testovima porasta tlaka

konvencionalnih ležišta, odakle slijedi razvoj novih metoda za nekonvencionalna ležišta, s većom ili manjom pouzdanošću u procjeni rezultata.

Početna metoda u analizi pada tlaka proizvodnog testa u konvencionalnom ležištu temelji se na rješenju jednadžbe difuzije za radijalni protok u modelu neograničenog ležišta, putem logaritamske aproksimacije eksponencijalnog integrala (van Everdingen i Hurst, 1949), koja omogućuje polu-logaritamski prikaz dinamičkog tlaka u funkciji vremena. Ukoliko se definiraju i bezdimenzionalne varijable, kao što su bezdimenzionalni tlak, p_{wD}, i bezdimenzionalno vrijeme, t_D, tada se u ovoj analizi može koristiti i metoda tipskih krivulja. Osim toga, kao točnija koristi se i metoda derivacije tlaka, gdje je u log-log dijagramu dan odnos nagiba polu-logaritamskog prikaza bezdimenzionalnog tlaka, p_{wD}, i bezdimenzionalnog vremena, t_D, kada je vremenska skala izražena prirodnim logaritmom. Zaključno, primjenom načela superpozicije u Hornerovoj metodi, analizu proizvodnog testa prilagođava se testu porasta tlaka.

U modernim softverima za analizu testa porasta tlaka, kao što je program Saphir tvrtke Kappa (sveučilišna licenca #9643), također se koriste metode tipskih krivulja i derivacije tlaka, ali na drugačiji način. Program najprije konvertira opisana bezdimenzionalna rješenja jednadžbe difuzije tj. tipske krivulje u realne varijable, primjenjujući načelo superpozicije. Na temelju toga, se u Saphiru generira analitički model, kojeg se uspoređuje s mjerenim podacima i zatim postupkom regresije postavlja stvarni model. U daljnjoj proceduri postavljaju se podudarne točke (engl. *match points*), kao što je primjerice podudarni tlak, s pomoću kojeg se određuje propusnost ležišne stijene, *k*.

2.1. Analiza neustaljenog protoka u bušotini

2.1.1. Model radijalnog protoka iz ležišta u bušotinu

Iz konačnog oblika jednadžbe difuzije za radijalni protok definirana su rješenja ovisna o početnim i rubnim uvjetima, koja se za slučaj konstantnog protoka na unutarnjoj granici ležišta primjenjuju i u analizi testa porasta tlaka. Unutar ove grupe postoje tri rješenja, od kojih je prvo za slučaj neograničenog ležišta, a ostala dva za ograničena ležišta sa zatvorenom vanjskom granicom i s konstantnim tlakom na vanjskoj granici. U ranoj fazi proizvodnje tlak se uvijek ponaša kao u neograničenom ležištu, a taj se period zove neustaljeni (engl. *transient*) period, dok u kasnijoj fazi kada su dosegnute granice ležišta, ponašanje tlaka odstupa od slučaja za neograničeno ležište (Jordan i Mattar, 2002). Tada dolazi do polu-ustaljenog ili polu-stacionarnog stanja protoka (engl. *semi-steady state*), kada

je promjena tlaka u jedinici vremena inverzno proporcionalna volumenu fluida u pornom prostoru. U slučaju konstantnog tlaka na vanjskoj granici ležišta, uslijedit će stacionarno stanje (engl. *steady state*). Rješenje jednadžbe difuzije za neustaljeni period može se opisati jednadžbom:

$$p_{wf}(t) = p_i - \frac{qB\mu}{2\pi kh}\left[\frac{1}{2}\left(\ln\frac{kt}{\phi\mu c_t r_w^2} + 0,80907\right) + s\right] \tag{2.1}$$

gdje su: p_{wf} = dinamički tlak u bušotini na razini ležišta (Pa)

p_i = početni ležišni tlak (Pa)

t = vrijeme (s)

q = obujamski protok (trenutačna proizvodnja) (m^3/s)

B = obujamski koeficijent (m^3/m^3)

μ = dinamička viskoznost fluida (Pa·s)

k = apsolutna propusnost ležišne stijene (m^2)

h = efektivna debljina ležišta (m)

ϕ = efektivna šupljikavost ležišne stijene (dio cijelog)

c_t = ukupna stlačivost ležišta (Pa^{-1})

r_w = radijus unutarnje granice ležišta (m)

s = skin faktor (-)

Izvedena jednadžba temelji se na pretpostavci male stlačivosti, pa vrijedi za analizu tlaka u naftnim bušotinama. Analognim izvodom dolazi se do rješenja jednadžbe difuzije za stlačive fluide, pa je odgovarajuća jednadžba preuređena za analizu tlaka u plinskim bušotinama:

$$p_{wf}^2(t) = p_i^2 - \frac{p_{sc}q\mu ZT}{\pi T_{sc}kh}1,151\left(\log t + \log\frac{k}{\phi\mu c_t r_w^2} + 0,351 + 0,87s\right) \tag{2.2}$$

odnosno ista jednadžba izražena putem funkcije pseudo-tlaka (Al-Hussainy et al., 1966):

$$m\left(p_{wf}(t)\right) = m\left(p_i\right) - \frac{p_{sc}qT}{\pi T_{sc}kh}1,151\left(\log t + \log\frac{k}{\phi\mu c_t r_w^2} + 0,351 + 0,87s\right) \tag{2.3}$$

gdje su:

$$m(p) = 2\int_{p_0}^{p} \frac{p}{\mu Z} dp \tag{2.4}$$

p_{sc} = standardni tlak (Pa)

T_{sc} = standardna temperatura (K)

Z = faktor odstupanja realnog plina od idealnog, Z faktor (-)

T = temperatura (K)

Temeljem definicije skin faktora, dodatni pad tlaka u pribušotinskoj zoni, prouzročen promijenjenom propusnosti, k_s, na radijusu, r_s, može se izračunati prema jednadžbi:

$$\Delta p_s = s\left(\frac{qB\mu}{2\pi kh}\right) \tag{2.5}$$

gdje je: $s = \left(\frac{k}{k_s} - 1\right) \ln \frac{r_s}{r_w}$ (2.6)

Skina faktor se može izraziti i preko efektivnog radijusa bušotine (Prats et al., 1962):

$$r_w' = r_w e^{-s} \tag{2.7}$$

Osim navedenih rješenja, u analizi testa porasta tlaka posebno je značajan bezdimenzionalni oblik jednadžbe difuzije, jer su pomoću bezdimenzionalnih varijabli definirana grafička rješenja tj. tipske krivulje za analizu proizvodnih testova. Analogno jednadžbi (2.2), rješenje bezdimenzionalnog oblika jednadžbe difuzije za plinsku bušotinu je:

$$p_i^2 - p_{wf}^2(r,t) = \frac{p_{sc} q \mu Z T}{\pi T_{sc} kh} p_D \tag{2.8}$$

u kojem se bezdimenzionalni tlak može definirati kao:

$$p_D = \frac{\pi T_{sc} kh\left(p_i^2 - p_{wf}^2\right)}{p_{sc} q \mu Z T} \tag{2.9}$$

Uz definirane početne i rubne uvjete, rješenje bezdimenzionalnog oblika jednadžbe difuzije za neustaljeni protok je:

$$p_D(t_D, r_D) = \frac{1}{2}\left[\ln\left(\frac{t_D}{r_D^2}\right) + 0{,}80907 \right] \tag{2.10}$$

Bezdimenzionalno vrijeme, t_D, i radijus u bezdimenzionalnoj formi, r_D, definirani su kao:

$$t_D = \frac{kt}{\phi \mu c_t r^2} \tag{2.11}$$

$$r_D = \frac{r}{r_w} \tag{2.12}$$

U proizvodnim modela koji se primjenjuju za slučaj konstantnog protoka, bezdimenzionalni radijus iznosi 1, što se odnosi na uporabu jednadžbe (2.10) kod analize testova porasta tlaka.

Opisane jednadžbe difuzije za radijalni protok temelje se na idealnim pretpostavkama o svojstvima ležišta i ležišnog fluida. Pretpostavlja se izotropno, homogeno, horizontalno, vertikalno ograničeno, a lateralno neograničeno cilindrično ležište s bušotinom u središtu. Svojstva ležišta su neovisna o tlaku, a protok u ležištu podliježe Darcyjevom zakonu, gradijenti tlaka su mali, a gravitacijski efekti zanemarivi.

Međutim, stvarna svojstva ležišta i ležišnog fluida odstupaju od pretpostavljenih, pa su u modelima definirana i odstupanja od idealnih slučajeva. To se prvenstveno odnosi na već spomenuto ležište s promijenjenom propusnosti ležišne stijene u neposrednom okolišu bušotine, koja ovisi o raznim zahvatima tijekom bušenja i opremanja bušotine, kao i tijekom proizvodnje. Osim toga, postoje slučajevi, posebno u plinskim ležištima, gdje je pretpostavka Darcyjevog, tj. laminarnog protoka pogrešna, jer brzina protjecanja može biti takva da će se pojaviti turbulencija. Ona značajno utječe na ponašanje tlaka u ležištu, pa se njena komponenta također definirana i uvrštavaju se u model, radi točnijeg izračuna proizvodnih karakteristika bušotine. Sljedeći utjecaj na odstupanje od idealnog modela je način opremanja bušotine, jer ležište može biti nezacijevljeno (engl. *open hole*), zacijevljeno (engl. *cased hole*) ili opremljeno pješčanim zasipom (engl. *gravel pack*). Kontakt između bušotine i ležišta u većini slučajeva uspostavlja se naknadnim perforiranjem zaštitnih cijevi, cementnog kamena i ležišne stijene do određenog radijusa, što rezultira dodatnim padom tlaka u pribušotinskoj zoni. On ovisi o broju i promjeru perforacija, dubini prodora perforacija u ležišnu stijenu, a analogno utjecaju promijenjene propusnosti, može ga se iskazati s pomoću dodatnog skin faktora. Od ostalih odstupanja, značajan je utjecaj više bušotina u ležištu i nesimetrična površina crpljenja. U praksi, bušotine proizvode različitim

protocima, pa su primjenom načela superpozicije u prostoru rješenja prilagođena i ovom slučaju, a utjecaj granice ležišta odnosi se na odstupanja kod ograničenih ležišta tj. za slučaj polu ustaljenog i ustaljenog protjecanja fluida (Čikeš, 2015). Najznačajnije odstupanje od idealnih modela odnosi se na već spomenuti efekt skladištenja fluida u bušotini, jer je od velike važnosti u analizi hidrodinamičkih mjerenja (engl. *well test analysis*), kao što je prikazano na slikama 9 i 10.

Na osnovu navedenih odstupanja od idealnih modela, ukupni pad tlaka u ležištu može se prilagoditi rješenju bezdimenzionalnog oblika jednadžbe difuzije (2.8), koje za realan slučaj radijalnog protoka plina može imati oblik (Zeng i Zhao, 2008):

$$p_i^2 - p_{wf}^2 = \frac{p_{sc} q \mu_g Z T}{\pi k h T_{sc}} \left[p_D + s + s_p + s_{dp} + Dq \left(\frac{\beta_s}{\beta} - 1 \right) \left(1 - \frac{r_w}{r_s} \right) + Dq + D_{dp} q \right] \tag{2.13}$$

U ovoj jednadžbi je uzeto nekoliko odstupanja u obzir: promijenjena propusnost u pribušotinskoj zoni, s; turbulentni protok u pribušotinskoj zoni i ostatku ležišta, izražen faktorom turbulentnog protoka, D, i koeficijentom turbulencije, β; način opremanja, iskazan skin faktorima radi nepotpunog raskrivanja ležišta, s_p, i radi smanjenja propusnosti u zbijenoj zoni oko perforacija, s_{dp}.

Rješenja za test porasta tlaka u modelima stimuliranih plinskih bušotina, pomoću kojih se određuje propusnost stijene, temelje se na izvodima iz jednadžbi (2.2) tj. (2.3), odnosno (2.8), a u nekima su također definirana odstupanja od idealnih slučajeva. Stoga su u nastavku najprije objašnjeni glavni dijelovi proizvodnog modela za radijalni protok koji se primjenjuju u analizi testa pada i testa porasta tlaka, a zatim analogno njima i modeli stimuliranih bušotina. Na osnovu ovih modela, u 3. poglavlju su izdvojeni suvremeni pristupi za analizu slabo propusnih plinskih ležišta, provedeni u raznim tipovima stimuliranih bušotina. Nakon toga je u 4. poglavlju izvedena nova metoda za jedinstvenu primjenu u analizi testova porasta tlaka slabo propusnih ležišta. Ona je, u skladu s opisanim razvojem bazičnih proizvodnih modela, postavljena najprije za idealan slučaj, bez utjecaja eventualnih odstupanja, koja su za slučaj radijalnog protoka plina uključena u jednadžbi 2.13.

Osim opisanih odstupanja, uz rješenje jednadžbe difuzije (2.1) vezan je i uvjet za određivanje trajanja prijelaznog perioda, odnosno početka polu-stacionarnog stanja protjecanja, koji se koristi kod razvoja nove metode u 4. poglavlju rada. On se može primijeniti uz pretpostavku da bušotina proizvodi konstantnim protokom, a slijedi iz uvjeta $t_D/r_D^2 \geq 25$, iz kojeg je izveden izraz:

$$t_{pss} = \frac{\phi \mu c_t r_e^2}{4k} \tag{2.14}$$

a u kojoj je, r_e, drenažni radijus bušotine.

2.1.2. Primjena modela vertikalne bušotine u analizi testa porasta tlaka

U svim metodama za analizu testa porasta tlaka prvenstveno je potrebno odrediti period ispitivanja bušotine u kojem je trajao efekt skladištenja, kao naknadni promjenljivi dotok nakon zatvaranja bušotine. Ona tada djeluje kao skladište određenog obujma fluida, pa se pretpostavljajući konstantnu površinu poprečnog presjeka bušotine, A_{wb}, može izvesti izraz za konstantu skladištenja:

$$C = \frac{A_{wb}}{\varphi g} \tag{2.15}$$

koja vrijedi za dvofazni protok. Ako se radi o plinskoj bušotini, onda je konstanta skladištenja fluida definirana volumenom bušotine koji komunicira s ležištem, V_{wb}:

$$C = c_{wb} \cdot V_{wb} \tag{2.16}$$

gdje je, c_{wb}, stlačivost plina, koja je stroga funkcija tlaka, pa se pojednostavljeno računa kao $c_{wb}=1/p_{wb}$, pri bušotinskim uvjetima. Njen bezdimenzionalni oblik definiran je kao:

$$C_D = \frac{C}{2\pi h \phi c_t r_w^2} \tag{2.17}$$

Utjecaj trajanja efekta skladištenja fluida u bušotini bitan je kod razvoja nove metode u 4. poglavlju rada, jer se odražava na oblik krivulje testa porasta tlaka.

2.1.2.a Metoda polu-logaritamskog prikaza tlaka u funkciji vremena

Iz rješenja za plinske bušotine (2.2) za slučaj proizvodnog testa tj. testa pada tlaka slijedi da će dijagram kvadrata dinamičkog tlaka, p^2_{wf}, u polu-logaritamskom mjerilu odnosno u funkciji, log t, dati pravac čiji je nagib, m, definiran izrazom:

$$m = 1{,}151 \frac{p_{sc} q \mu_g Z T}{\pi k h T_{sc}} \tag{2.18}$$

a u slučaju rješenja izraženog funkcijom pseudo-tlakova (2.3), nagib, *m*, je:

$$m = 1{,}151 \frac{p_{sc} q T}{\pi k h T_{sc}} \tag{2.19}$$

Propusnost plinskog ležišta određuje se pomoću poznatog nagiba, *m*, iz:

$$k = 1{,}151 \frac{p_{sc} q \mu Z T}{\pi h m T_{sc}} \tag{2.20}$$

a skin faktor slijedi iz:

$$s = 1{,}151 \left(\frac{p_i^2 - p_{wf}^2(t)}{m} - \log t - \log \frac{k}{\phi \mu c_t r_w^2} - 0{,}351 \right) \tag{2.21}$$

U slučaju kad su rješenja izraženih funkcijom pseudo-tlakova, propusnost i skin faktor su:

$$k = 1{,}151 \frac{p_{sc} q T}{\pi h m T_{sc}} \tag{2.22}$$

$$s = 1{,}151 \left(\frac{m\left(p_i\right) - m\left(p_{wf}(t)\right)}{m} - \log t - \log \frac{k}{\phi \mu c_t r_w^2} - 0{,}351 \right) \tag{2.23}$$

Točnost interpretacije stvarnog proizvodnog testa ovisi o količini mjerenih podataka dinamičkih tlakova koji se preklapaju s dijagnostički pravcem, jer i u ovoj metodi dolazi do odstupanja glavnine podataka radi utjecaja efekta skladištenja u bušotini. Stoga se kao dodatna metoda u provjeri rezultata proizvodnog testa provodi metoda tipskih krivulja, a ista analogija odabira nekoliko metoda radi usporedbe rezultata koristi se i u interpretiranju testova porasta tlaka i u konvencionalnim i u nekonvencionalnim ležištima.

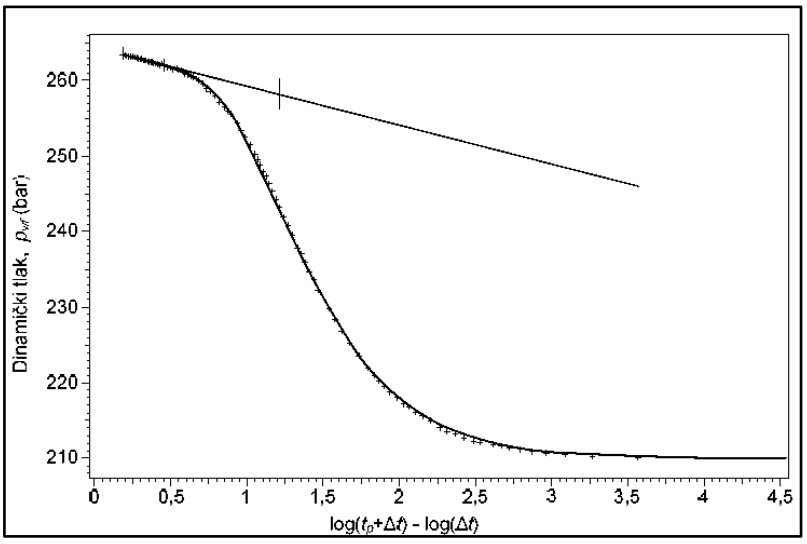
S obzirom da je u proizvodnom testu teško održavati konstantan protok, uobičajeno je da se nakon njega provodi test porasta tlaka, zatvaranjem bušotine na ušću i mjerenjem porasta tlaka na dnu. U ovoj metodi se primjenom načela superpozicije, analizu proizvodnog testa prilagođava testu porasta tlaka, koji se tada može tretirati kao test s dva protoka: protok *q*, koji stvarno traje do t_p, uzimamo kao da traje i nakon t_p, ali istodobno počinje protok *-q* (pa je rezultanta 0) i traje do *t* (kao i protok *q*). Prema standardnim oznakama uzima se da je $t = t_p + \Delta t$, gdje je Δt vrijeme trajanja testa porasta, a razlika tlaka je: $\Delta p = p_i^2 - p^2_{ws}$. Poznati Hornerov oblik jednadžbe pogodan za analizu testa porasta tlaka je (Horner, 1951):

$$p_{ws}^2 = p_i^2 - \frac{p_{sc} q \mu Z T}{\pi T_{sc} k h} 1{,}151 \times \log \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \tag{2.24}$$

Analogno metodi za proizvodni test, Hornerova jednadžba (slika 8) ukazuje da će dijagram porasta tlaka u polu-logaritamskom mjerilu (p_{ws}^2 u funkciji $log\ ((t_p+\Delta t)/\Delta t)$) dati pravac nagiba m (jednadžba 2.18), gdje je stvarno vrijeme zamijenjeno tzv. Hornerovim vremenom ($(t_p+\Delta t)/\Delta t$), a podaci koji ne leže na pravcu odnose se na period skladištenja fluida. S pomoću nagiba pravca može se izračunati propusnost ležišta prema jednadžbi (2.20), a skin faktor se tada računa prema jednadžbi:

$$s = 1{,}151 \left(\frac{p_{ws}^2(\Delta t = 1h) - p_{wf}^2(\Delta t = 0)}{m} - \log \frac{k}{\phi \mu c_t r_w^2} - 3{,}91 \right) \tag{2.25}$$

u kojoj je $p_{ws(\Delta t=1h)}$ dobiven ekstrapolacijom pravca nagiba m do vremena Δt = 1 h, tj. do odgovarajućeg Hornerovog vremena, a $p_{wf(\Delta t=0)}$ posljednja točka dinamičkog tlaka.



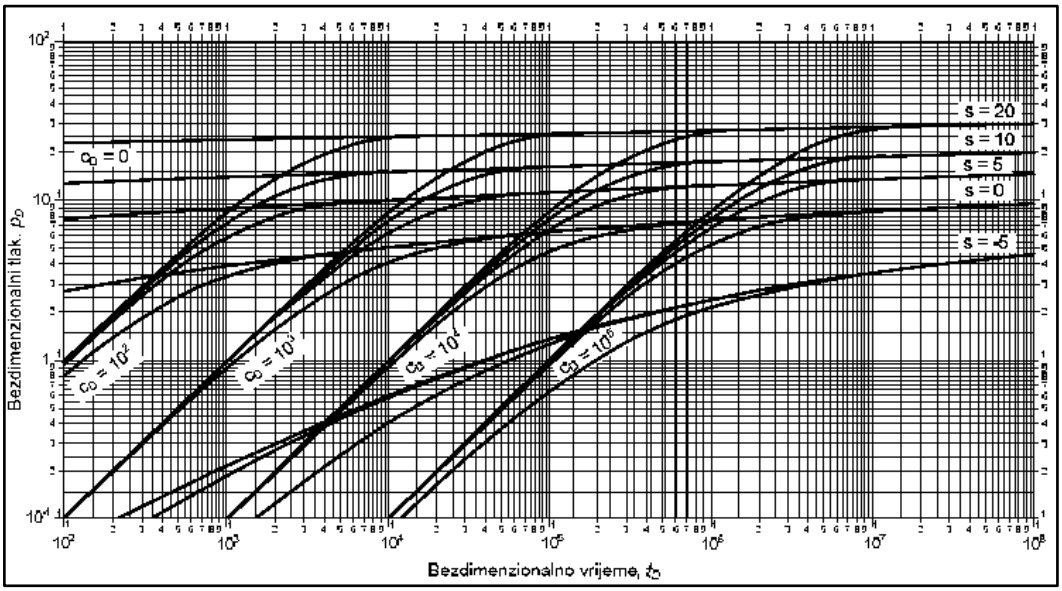
Slika 8: Analiza testa porasta tlaka Hornerovom metodom (Saphir, 2016)

2.1.2.b Metoda tipskih krivulja

Kod tipskih krivulja, koje predstavljaju grafička rješenja jednadžbe difuzije temeljene na bezdimenzionalnim varijablama, rješenja su univerzalna, a razlikuju se samo definicije bezdimenzionalnih varijabli, ovisno o vrsti fluida u protjecanju. Njeno rješenje za neograničeno ležište s konstantnim protokom na unutarnjoj granici za uvjet, $t_D/r_D^2 \geq 25$, ima sljedeću logaritamsku aproksimaciju:

$$p_D(t_D) = \frac{1}{2}\left(\ln t_D + 0{,}80907\right) + s \tag{2.26}$$

gdje je $r_D = 1$ i dodan je skin faktor, s. Rješenje jednadžbe difuzije koje uključuje efekt skladištenja, C_D, i skin efekt, s, dano je u obliku tipskih krivulja na slici 9.



Slika 9: Bezdimenzionalni tlak za bušotinu u neograničenom ležištu, s uključenim efektom skladištenja, C_D, i skin faktorom, s (Agarwal et al., 1970)

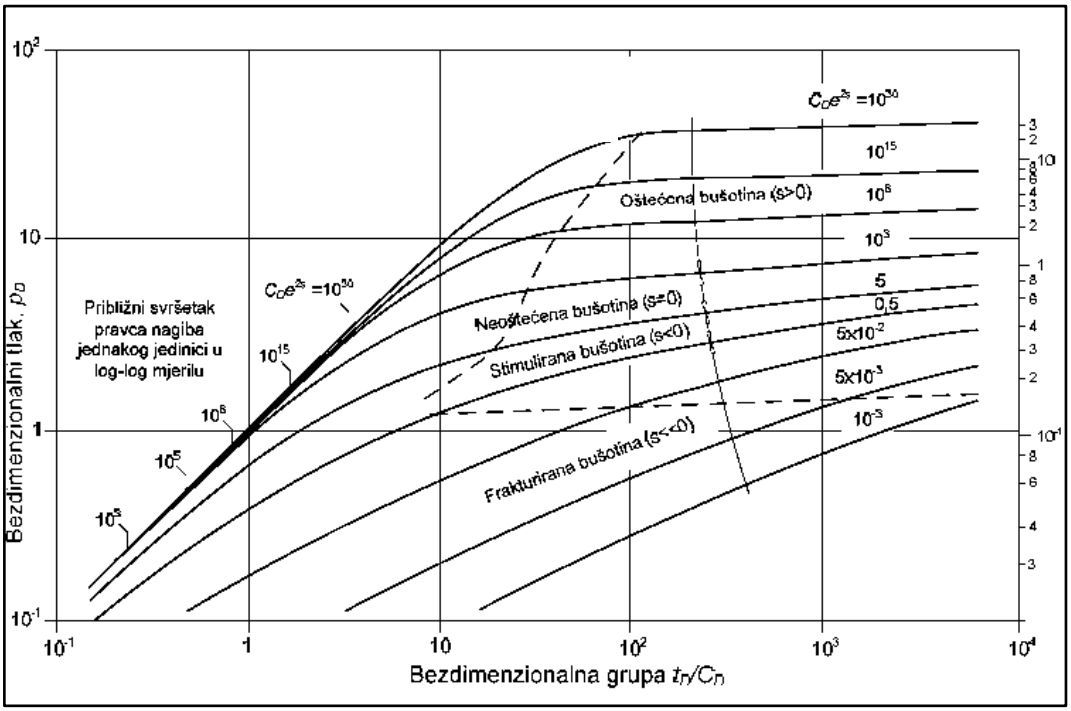
Za bušotinu u ležištu zadanih vrijednosti, t_D, C_D i s, može se odrediti vrijednost bezdimenzionalnog tlaka, p_D, a time i stvarnog tlaka, a najvažnije zapažanje ovog log-log dijagrama primjenjuje se u analizi testova porasta tlaka. Ono se odnosi na nagib pravca, p_D, u funkciji, t_D, koji je jednak jedinici sve dok traje efekt skladištenja fluida, tj. ima nagib od 45°, karakterističan za rana vremena. To znači da rješenja za određeni C_D i $C_D = 0$ postaju identična nakon određenog protoka vremena, odakle je definirano vrijeme, t_{wbs}, koje se naziva 'kraj poremećaja efektom skladištenja'. Za konvencionalan ležišta je utvrđeno da ono

nastupa prosječno jedna i pol logaritamski ciklus nakon nestanka nagiba pravca jednakog jedinici, dok za nekonvencionalna ležišta ugljikovodika za sada ovo rješenje ne postoji. Osim toga, važna primjena u analizi testa porasta tlaka je i definicija bezdimenzionalnog vremena kod kojeg prestaje poremećaj zbog efekta skladištenja:

$$t_D = \left(60 + 3{,}5s\right) C_D \tag{2.27}$$

Do točnije primjene tipskih krivulja došlo je grupiranjem bezdimenzionalnih varijabli (slika 10), gdje je bezdimenzionalni tlak, p_D, dan u funkciji bezdimenzionalne grupe t_D/C_D, a krivulje su karakterizirane grupom C_De^{2s}. Za rana vremena, sve krivulje se također asimptotski približavaju pravcu nagiba jednakog jedinici, što odgovara utjecaju skladištenja, a kasnije se može primijeniti rješenje jednadžbe difuzije za neograničeno ležište (2.26), s uključenim koeficijentom skladištenja:

$$p_D(t_D) = \frac{1}{2}\left(\ln \frac{t_D}{C_D} + 0{,}80907 + \ln C_D e^{2s} \right) \tag{2.28}$$



Slika 10: Bezdimenzionalni tlak, p_D, u funkciji bezdimenzionalne grupe, t_D/C_D (Gringarten et al., 1975)

Princip metode tipskih krivulja svodi se na preklapanje (tzv. 'mečiranje') mjerenih podataka s tipskim krivuljama iz kojih se odabiru podudarne točke (engl. *match points*) s

pomoću kojih se zatim izračunavaju traženi parametri ležišta. Mjereni podaci unose se u log-log dijagram razlike tlaka, $\Delta p = p_i^2 - p_{wf}^2$ ili $\Delta m = m(p_i) - m(p_{wf})$, u funkciji vremena, t. Odabrane točke preklapanja s tipskim krivuljama su $(p_D)_M$ i $(\Delta p)_M$, te se iz definicija bezdimenzionalnih varijabli izračunava propusnost plinskog ležišta:

$$k = \frac{p_0 q \bar{\mu} \bar{Z} T \left(p_D\right)_M}{\pi T_0 h (\Delta p^2)_M} \text{ ili } k = \frac{p_0 q T \left(p_D\right)_M}{\pi T_0 h \left[\Delta m(p)\right]_M} \qquad (2.29) \text{ i } (2.30)$$

2.1.2.c Metoda derivacije tlaka

Tipske krivulje su primjenjive za analizu porasta tlaka, ako se umjesto stvarnog vremena koristi modificirano Hornerovo vrijeme, poznato kao ekvivalentno vrijeme (Agarwal, 1980):

$$\Delta t_e = \frac{t_p \Delta t}{t_p + \Delta t} \qquad (2.31)$$

Tada se u log-log dijagram unosi mjerene podatke, tj. razliku tlaka: $\Delta p = p_{ws}^2(\Delta t) - p_{wf}^2(\Delta t=0)$ ili $\Delta m = m(p_{ws(\Delta t)}) - m(p_{wf(\Delta t=0)})$ i derivaciju tlaka, $\Delta p'$, u funkciji modificiranog Hornerovog vremena, Δt_e (slika 12). Derivacija tlaka, p', tada je dana u odnosu na prirodni logaritam ekvivalentnog vremena, koje se može primijeniti samo ako je prije zatvaranja bušotine za porast tlaka, bio dosegnut neograničeno djelujući radijalni protok. U slučaju kada je Δt mali u odnosu na t_p, tada se ekvivalentno vrijeme može poistovjetiti sa vremenom mjerenja porasta tlaka ($\Delta t_e \approx \Delta t$), a derivaciju tlaka se u metodi računa prema:

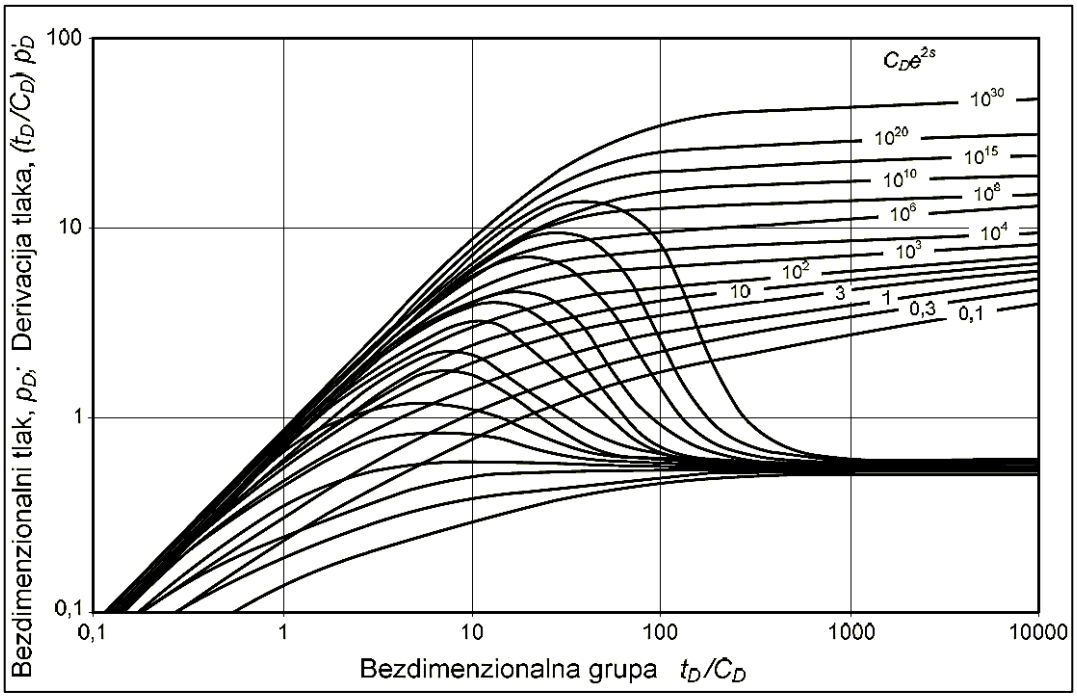
$$p' = \Delta t \frac{d\Delta p}{d\Delta t} \qquad (2.32)$$

Derivacija bezdimenzionalnog tlaka za analizu testa porasta tlaka se u originalnoj Bourdet metodi na slici 11 koristi temeljem jednadžbe:

$$p'_D = \left(t_D / C_D\right) \frac{dp_D}{d\left(t_D / C_D\right)} \qquad (2.33)$$

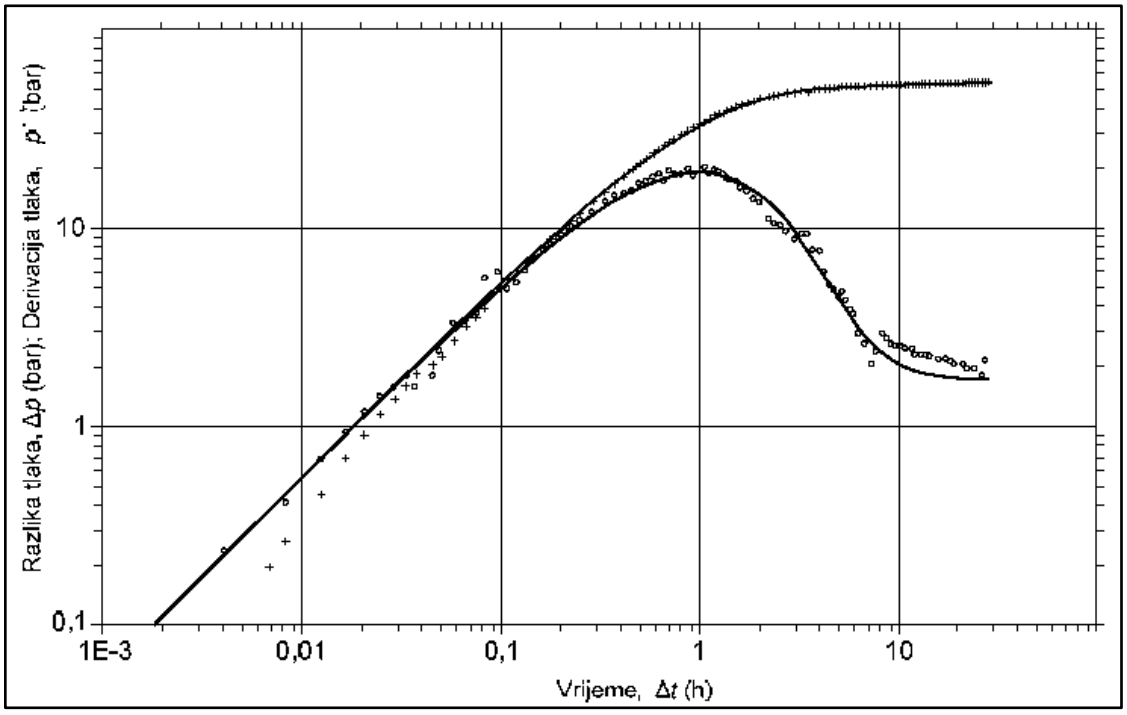
Sve derivacije tlaka se u ranim vremenima ponašaju identično tj. asimptotski se približavaju pravcu nagiba 1, isto kao i krivulje bezdimenzionalnog tlaka. U trenutku kada je dosegnut neograničeno djelujući radijus, sve derivacije bezdimenzionalnog tlaka po bezdimenzionalnoj grupi t_D/C_D se približavaju drugoj asimptoti s vrijednošću 0,5. Između

ovih dviju asimptota, ovisno o bezdimenzionalnoj grupi C_De^{2s} svaka krivulja ima specifičan oblik, koji se kao moćna dijagnostička metoda koristi u suvremenim softverima.



Slika 11: Tipske krivulje za neograničeno ležište s efektom skladištenja, C_D, i skin efektom,s (Economides i Nolte, 2000; Bourdet, 1989)

Postupak ove metode prikazan je na slikama 11 i 12, gdje se mjereni podaci preklapaju s tipskim krivuljama tako da se najprije dio podataka s konstantnom derivacijom poklopi s asimptotom tipske krivulje konstantne vrijednosti 0,5. Time su određeni, p_D, i, Δp, iz kojih se određuje tzv. podudarni tlak, $(p_D/\Delta p)_M$. S pomoću njegove vrijednosti moguće je odrediti propusnost stijene, k, prema jednadžbi (2.29).



Slika 12: Analiza testa porasta tlaka metodom tipskih krivulja i derivacijom tlaka (Saphir, 2016)

Ključni zaključak koji slijedi iz analize testa porasta tlaka prikazane na slici 12 neovisan je o tome radi li se o konvencionalnom ili nekonvencionalnom ležištu, odnosno radi li se o ispitivanju vertikalne bušotine ili o ispitivanju nekog drugog tipa bušotine u slabo propusnim ležištima. Dakle, iako se na prikazanom dijagramu radi o konvencionalnom ležištu nafte i vertikalnoj bušotini, ključno je da se rezultati ove analize ne mogu uzeti kao dovoljno pouzdani s obzirom da nije došlo sasvim do stabilizacije derivacije tlaka na konstantnoj vrijednosti. To znači da mjerenje testa porasta tlaka nije trajalo dovoljno dugo da bi se mogao primijeniti opisani princip neograničeno djelujućeg radijalnog protoka. S obzirom da je u cijeloj metodologiji najznačajnije što točnije odrediti propusnost, *k*, u slučaju ležišta dobre propusnosti, rješenje ovog problema je jednostavno, jer mjerenje uobičajeno traje tri dana, što je dulje od deset sati prikazanih slikom 12, pa derivacija tlaka ulazi u područje stabilizacije. U nekonvencionalnom ležištu bi to vrijeme trebalo biti znatno dulje, čak i do nekoliko godina (DDA book, 2017; Economides, 1984). Stoga se procjena pouzdanosti rezultata testova porasta tlaka u slabo propusnim ležištima temelji na individualnom pristupu svakoj bušotini, pri čemu se najprije provodi prilagođena primjena opisane metodologije za testove porasta tlaka u konvencionalnim ležištima, a zatim se mogu

uzeti u obzir neka od objavljenih rješenja za slabo propusna ležišta. Poboljšanje njihove pouzdanosti je i dalje aktualan dio suvremenih istraživanja testova porasta tlaka slabo propusnih ležišta, jer konačno i najprihvatljivije rješenje još nije otkriveno, a predstavlja jedan od ciljeva doktorskog rada.

2.2. Analiza tlaka horizontalne bušotine

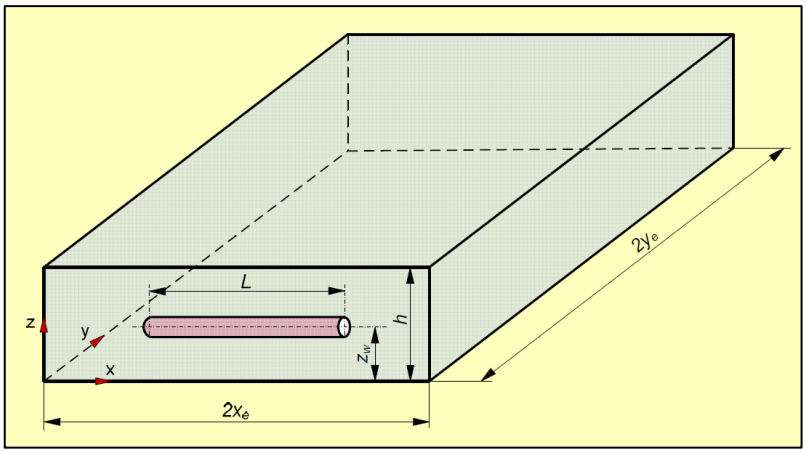
Za razliku od radijalnog oblika protoka u vertikalnoj bušotini, kod stimuliranih tipova bušotina tijekom cijelog neustaljenog stanja protjecanja dolazi do različitih oblika protoka, koji su za konvencionalan ležišta nafte i plina opisani u nastavku (Economides i Nolte, 2000; Koščak Kolin et al., 2013).

2.2.1. Model protoka kroz horizontalnu bušotinu

Kod protjecanja fluida u ležištu s horizontalnom bušotinom neustaljeno stanje protjecanja opisano je modelom neograničenog ležišta, prema kojem može doći do četiri različita oblika protoka: ranog radijalnog protoka, ranog linearnog, kasnog radijalnog i kasnog linearnog protoka. Matematički se ovo protjecanje opisuje modelom trodimenzionalnog linearnog protoka. Jednadžba difuzije za takav protok u anizotropnom ležištu ($k_x \neq k_y \neq k_z$) dana je jednadžbom (Matthews i Russel, 1967):

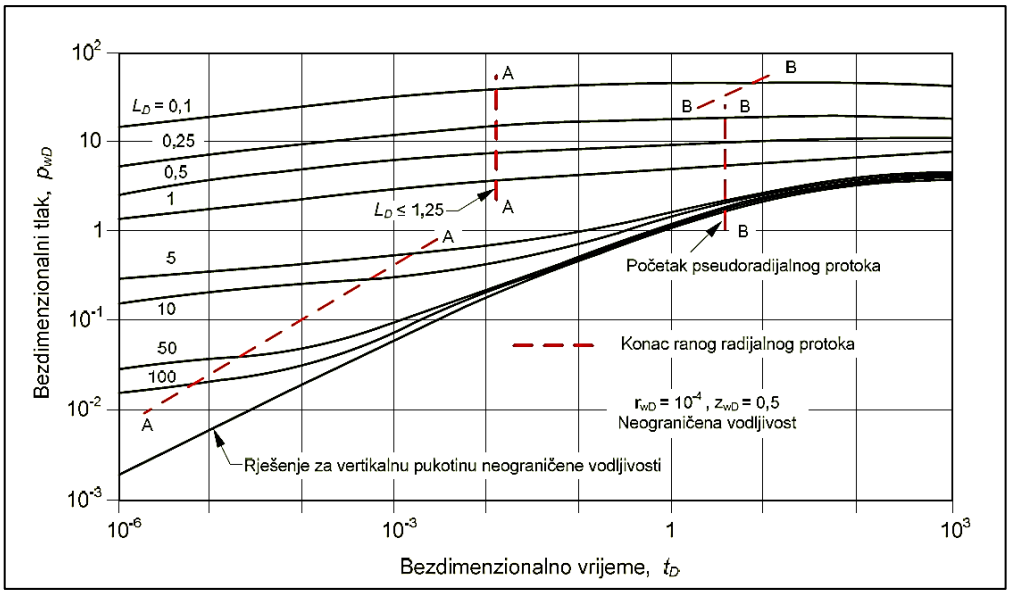
$$k_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k_x \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + k_x \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \phi \mu c_t \frac{\partial p}{\partial t} \tag{2.34}$$

Na slici 13 prikazan je trodimenzionalni model prilagođen ležištu s horizontalnom bušotinom. U ovom modelu horizontalni dio bušotine ima duljinu L i radijus r_w, izbušen je paralelno osi x, na udaljenosti z_w od dna ležišta, a njegovo središte je u ishodištu koordinatnog sustava ($x = 0$, $y = 0$, $z = 0$). Ležište je u obliku kvadra, debljine (visine) h, duljine $2y_e$ i širine $2x_e$, a vrijedi odnos $L < 2x_e$. S obzirom da je ležište anizotropno, ekvivalentna horizontalna propusnost je definirana kao $k_H = \sqrt{k_x k_y}$, a vertikalna kao $k_v = k_z$.



Slika 13: Model horizontalne bušotine (Koščak Kolin et al., 2013)

Jednadžba (2.34) riješena je za neograničeno ležište, koristeći rješenja razvijena za hidraulički frakturirane bušotine s pukotinom neograničene vodljivosti (engl. *infinite conductivity*) ili jednolikog strujanja (engl. *uniform flux*) (Soliman, 1998; Clonts i Ramey, 1986). Pritom su korištene definicije bezdimenzionalnih parametara, kao što su: bezdimenzionalni tlak, bezdimenzionalno vrijeme, bezdimenzionalna duljina horizontalne bušotine, bezdimenzionalne udaljenosti u smjeru osi *x*, u smjeru osi *y* i u smjeru osi *z*, te bezdimenzionalna vertikalna ekscentričnost bušotine. Osim za neke specifične slučajeve, analitičko rješenje se ne može iskazati poznatim funkcijama, pa su pojedina rješenja dana tablično i u obliku tipskih krivulja (Clonts i Ramey, 1986). Jedno od tih rješenja u obliku tipskih krivulja prikazano je na slici 14, gdje je prikazan bezdimenzionalni tlak u središtu bušotine, na radijusu, r_w, za različite bezdimenzionalne duljine bušotine, L_D, dan u funkciji bezdimenzionalnog vremena, t_D. Krivulje se odnose na bušotinu u središtu ležišta ($z_{wD} = 0{,}5$) i za konstantan bezdimenzionalni radijus bušotine ($r_{wD} = 10^{-4}$).



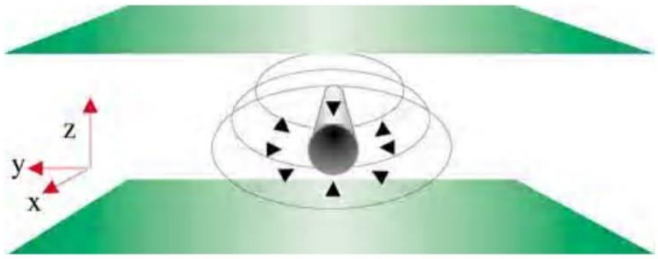
Slika 14: Bezdimenzionalni tlak u središtu horizontalne bušotine, smještene u vertikalnom središtu neograničenog ležišta (Soliman, 1998)

Jednadžba (2.34) riješena je i za ograničeno ležište (Odeh i Babu, 1990; Babu i Odeh, 1989; 1988). Rješenje sadrži neustaljeni i ustaljeni protok, a neustaljeni protok indicira moguće pojavljivanje četiri oblik protjecanja. Dakle, mogući su redom, rani radijalni protok, rani linearni, kasni pseudo-radijalni i kasni linearni protok, s pomoću kojih su definirana rješenja za izračun propusnosti stijene u proizvodnom i u testu porasta tlaka, analogno opisanoj proceduri za vertikalnu bušotinu.

Rani radijalni protok se pojavljuje vrlo rano. Čim se bušotinu otvori za proizvodnju ili ju se zatvori za porast tlaka, oblik protjecanja oko bušotine je radijalan u vertikalnoj ravnini. Rani radijalni protok oko horizontalne bušotine sličan je protoku vertikalne, potpuno penetrirajuće bušotine, u neograničenom ležištu (slika 15). Drugim riječima, horizontalna bušotina se ponaša kao vertikalna u ležištu debljine jednake duljini horizontalne bušotine, tj. $h = L$.

Rani radijalni protok traje relativno kratko, osim ako je debljina ležišta razmjerno velika, odnosno, ako je horizontalni dio bušotine značajnije udaljen od gornje i donje granice. Međutim, tada radijalni protok može poremetiti obično zanemareni utjecaj gravitacije. Značajnije razlike vertikalne i horizontalne propusnosti također mogu iskriviti radijalne karakteristike ovog perioda protjecanja, mijenjajući oblik protjecanja u eliptični. Stoga, za razliku od vertikalne bušotine, gdje se uzima iste propusnosti u svim smjerovima

u horizontalnoj ravnini, za radijalni protok u horizontalnoj bušotini treba uzeti prosječnu propusnost u vertikalnoj ravnini, tj. $k = \sqrt{k_y k_V}$.



Slika 15: Rani radijalni protok u ležištu s horizontalnom bušotinom (Houze et al., 2012)

Uzevši da je $h = L$ i $k = \sqrt{k_y k_V}$, dinamički tlak u horizontalnoj bušotini, koja proizvodi konstantnim protokom, za vrijeme ranog radijalnog protoka, dan je jednadžbom za radijalni protok vertikalne bušotine u neograničenom ležištu:

$$p_{wf}(t) = p_i - \frac{qB\mu}{2\pi L\sqrt{k_y k_V}}\left[\frac{1}{2}\left(\ln\frac{\sqrt{k_y k_V}\,t}{\phi\mu c_t r_w^2} + 0{,}80907\right) + s\right] \tag{2.35}$$

Analogno vertikalnoj bušotini, iz gornje jednadžbe slijedi praktično rješenje za analizu pada tlaka u proizvodnom testu horizontalne bušotine:

$$p_{wf}(t) = p_i - \frac{qB\mu}{2\pi L\sqrt{k_y k_V}}1{,}151\left[\log t + \log\frac{\sqrt{k_y k_V}}{\phi\mu c_t r_w^2} + 0{,}351 + 0{,}87s\right] \tag{2.36}$$

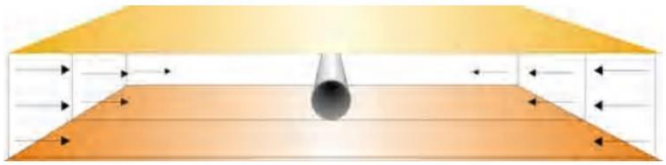
Naime, polulogaritamski prikaz dinamičkog tlaka u funkciji vremena (p_{wf} u funkciji *log t*) dat će pravac nagiba $m = 1{,}151\frac{qB\mu}{2\pi L\sqrt{k_y k_V}}$, pa se tada može izračunati ekvivalentna propusnost u vertikalnoj ravnini oko horizontalne bušotine:

$$\sqrt{k_y k_V} = 1{,}151\frac{qB\mu}{2\pi Lm} \tag{2.37}$$

Trajanje ranog radijalnog protoka određeno je vremenom potrebnim da se dosegne najbliža granica, što može biti gornja ili donja granica ležišta (krovina ili podina) ili, pak, vrh bušotine.

Rani linearni protok nastupa ako je horizontalni dio bušotine dostatno dug u usporedbi s debljinom ležišta, pa gornja i donja granica ležišta utječu na ponašanje tlaka, dok je utjecaj vrha bušotine biti zanemariv. Kod pojave linearnog protoka je glavnina pada tlaka u horizontalnom smjeru, a fluid se giba linearno prema bušotini (slika 16). Minimalni uvjet za postojanje ovog oblika protoka u ležištu s horizontalnom bušotinom, definiran je kao (Odeh i Babu, 1990):

$$L \geq 3{,}33\left(h - z_w\right)\sqrt{\frac{k_y}{k_V}} \tag{2.38}$$



Slika 16: Rani linearni protok u ležištu s horizontalnom bušotinom (Houze et al., 2012)

Rani linearni protok prema horizontalnoj bušotini sličan je protoku prema vertikalnoj pukotini neograničene vodljivosti, u neograničenom ležištu, ali s nepotpunom penetracijom po debljini ležišta. Drugim riječima, horizontalna bušotina se ponaša kao frakturirana vertikalna, s visinom pukotine manjom od debljine ležišta, tj. $h_f < h$. Razlika tlaka za vrijeme linearnog protoka glasi:

$$p_i - p_{wf}\left(t\right) = \frac{qB\mu}{2\pi k_H h}\sqrt{\frac{\pi k_H t}{\phi\mu c_t \left(L/2\right)^2}} \tag{2.39}$$

a dodatni pad tlaka zbog skin efekta, definiran jednadžbom (van Everdingen i Hurst, 1949) može se prilagoditi horizontalnoj bušotini analogno jednadžbi (2.35), tj. uzevši da je $h = L$ i $k = \sqrt{k_y k_V}$. Pritom mehaničkom skin faktoru, s, prouzročenom smanjenjem propusnosti oko horizontalne bušotine, treba pribrojiti i pseudo-skin, s_z, prouzročen nepotpunim raskrivanjem ležišta po njegovoj debljini, pa je dodatni pad tlaka definiran kao:

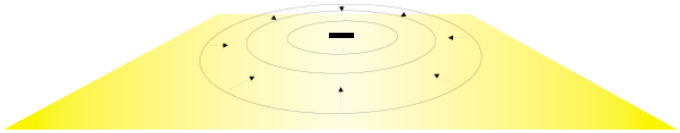
$$\Delta p_s = \frac{qB\mu}{2\pi L\sqrt{k_y k_V}}\left(s + s_z\right) \tag{2.40}$$

Pribroji li se jednadžbu (2.40) jednadžbi (2.39), nakon sređivanja, ona postaje:

$$p_i - p_{wf}(t) = \frac{qB\mu}{Lh}\left[\sqrt{\frac{t}{\pi\phi\mu c_t k_y}} + \frac{h}{2\pi\sqrt{k_y k_V}}(s + s_z)\right] \tag{2.41}$$

Početak linearnog protoka određen je vremenom dosezanja gornje i donje granice ležišta, a svršetak ranog linearnog protoka određuje vrijeme kod kojeg utjecaj vrha bušotine postaje značajan.

Kasni pseudo-radijalni protok se javlja kad se poremećaj tlaka u ležištu odmakne dostatno daleko od bušotine da se ona doima kao točka prema kojoj se ležišni fluid giba radijalno u horizontalnoj ravnini (slika 17). Ovaj period je analogan pseudo-radijalnom protoku u vertikalnoj frakturiranoj bušotini. Slično, vrijeme postizanja ovog oblika protjecanja u slabo propusnim ležištima može biti vrlo dugo. Minimalni uvjet za uspostavljanje pseudo-radijalnog protoka u ležištu s horizontalnom bušotinom definiran je kao $L/2x_e < 0{,}45$ (Odeh i Babu, 1990).



Slika 17: Kasni radijalni protok u ležištu s horizontalnom bušotinom (Houze et al., 2012)

Razlika tlaka za vrijeme pseudo-radijalnog protoka u ležištu, nakon uvrštavanja definicija bezdimenzionalnih varijabli i dodatnog pada tlaka zbog skin efekta, definiranog jednadžbom (2.40), glasi:

$$p_i - p_{wf}(t) = \frac{qB\mu}{2\pi k_H h}1{,}151\left(\log t + \log\frac{k_H}{\phi\mu c_t L^2} + 1{,}822\right) + \frac{qB\mu}{2\pi L\sqrt{k_y k_V}}(s + s_z) \tag{2.42}$$

Naime, polu-logaritamski prikaz dinamičkog tlaka u funkciji vremena (p_{wf} u funkciji *log t*) dat će pravac nagiba $m = 1{,}151\dfrac{qB\mu}{2\pi k_H h}$, pa se tada može izračunati ekvivalentna propusnost u horizontalnoj ravnini:

$$k_H = 1{,}151\frac{qB\mu}{2\pi hm} \tag{2.43}$$

Kraj ovog protoka je onda kad se očituje utjecaj jedne od lateralnih granica ležišta, tj. granica u smjeru osi *x* ili granica u smjeru osi *y*.

Kasni linearni protok se pojavljuje kad je ležište izduljeno u smjeru okomitom na horizontalnu bušotinu, tj. u *y* smjeru. Nakon dostatno dugog vremena proizvodnje, granice ležišta u vertikalnom smjeru i u smjeru horizontalne bušotine (*x* smjer) počinju djelovati, pa je protok u ova dva smjera u biti polu-ustaljen. Stoga je protok u smjeru okomitom na smjer bušotine linearan.

Analogno ranom linearnom protoku, pad tlaka u ležištu je dan jednadžbom (2.39), s tim da L postaje $2x_e$. Dodatni pad tlaka zbog skin efekta definiran je jednadžbom (2.40), u kojoj također L postaje $2x_e$, zbog čega se skin faktorima dodaje i pseudo skin s_x, prouzročen nepotpunom penetracije bušotine po cijeloj širini ležišta ($L < 2x_e$). Dakle, pad tlaka u ležištu za vrijeme kasnog linearnog protoka dan je jednadžbom:

$$p_i - p_{wf}(t) = \frac{qB}{2x_e h}\sqrt{\frac{\mu t}{\pi\phi c_t k_H}} + \frac{qB\mu}{4\pi x_e \sqrt{k_y k_V}}\left(s + s_z + s_x\right) \tag{2.44}$$

2.2.2. Primjena modela horizontalne bušotine u analizi testa porasta

Glavna pretpostavka za analizu tlaka horizontalne bušotine je da je ona potpuno horizontalna i smještena u isto tako potpuno horizontalnom, homogenom ležištu, jednolike debljine, *h*. Za početak, uzmimo da je ležište izotropno u horizontalnoj ravnini, tj. da je horizontalna propusnost u svim smjerovima ista, $k_r = k_H = \sqrt{k_x k_y}$, ali da postoji vertikalna anizotropija, tj. da je vertikalna propusnost različita od horizontalne, ($k_z = k_V \neq k_H$). Pogled prema kraju horizontalne bušotine ekvivalentan je pogledu prema dnu vertikalne bušotine. Prvi oblik protjecanja nakon svršetka efekta skladištenja u vertikalnoj bušotini je radijalni protok, pa je isto tako i u horizontalnoj bušotini. Međutim, zbog anizotropije, protok oko horizontalne bušotine nije kružnog oblika, već eliptičnog, jer će difuzija sporije napredovati u vertikalnom smjeru. Samo ako bi ležište bilo potpuno izotropno u svim smjerovima, difuzija oko horizontalne bušotine bila bi potpuno radijalna. Kad jednom difuzija dosegne gornju i donju granicu, protok postaje linearan, ekvivalentno geometriji paralelnih rasjeda kod vertikalne bušotine (ako je geometrijski skin negativan). No, kako je duljina horizontalne bušotine ograničena, i trajanje linearnog protoka je ograničeno. Konačno, kad se difuzija protegne dostatno daleko od bušotine da duljina horizontalnog dijela bušotine (koji komunicira s ležištem) postane irelevantna, protok ponovno postaje radijalan, ekvivalentno normalnom radijalnom protoku u vertikalnoj bušotini.

Matematički modeli protjecanja u takvoj geometriji izvedeni su u prethodno. Prvi oblik (režim) protoka, često maskiran efektom skladištenja, je rani radijalni protok (slika 15, slika 18). U stvarnosti, prosječna (srednja) propusnost kombinira vertikalnu i radijalnu (horizontalnu) komponentu s horizontalnom anizotropijom. No, ako ignoriramo horizontalnu anizotropiju, prosječna propusnost je kombinacija vertikalne i horizontalne propusnosti. Duljinu horizontalnog dijela bušotine koja komunicira s ležištem, *L*, u takvom, radijalnom modelu možemo smatrati debljinom ležišta. Stoga se u analizi tlaka proizvodnog testa može primijeniti jednadžbu (2.37) za računanje ekvivalentne propusnosti u vertikalnoj ravnini, $\sqrt{k_y k_V}$. Pritom se *m* određuje iz polulogaritamskog prikaza dinamičkog tlaka (ili razlike ležišnog i dinamičkog tlaka) u funkciji vremena (p_{wf} u funkciji *log t* ili $\Delta p = p_i - p_{wf}$ u funkciji *log t*).

Primjenom načela superpozicije u vremenu, analizu proizvodnog testa može se prilagoditi testu porasta tlaka. Test porasta tlaka može se tretirati kao test s dva protoka: protok *q*, koji stvarno traje do vremena t_p, uzimamo kao da traje i nakon vremena t_p, ali istodobno počinje protok *-q* (pa je rezultanta 0) i traje do kraja testa porasta tlaka *t* (kao i protok *q*). Prema standardnim oznakama slijedi: $t = t_p + \Delta t$, $\Delta t = t - t_p$, $\Delta p = p_i - p_{ws}$, gdje je p_{ws}, statički tlak nakon zatvaranja bušotine za test porasta.

Iz rješenja jednadžbe difuzije za rani radijalni protok, uz uvjet $4t_D / r_{wD}^2 \geq 100 \Rightarrow t_D / r_{wD}^2 \geq 25$, slijedi oblik jednadžbe pogodan za analizu testa porasta tlaka horizontalne bušotine:

$$p_{ws} = p_i - \frac{qB\mu}{2\pi L\sqrt{k_y k_V}} 1{,}151 \times \log \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \tag{2.45}$$

analogan poznatoj Hornerovoj jednadžbi za vertikalnu bušotinu (Horner, 1951).

To znači da će dijagram porasta tlaka (ili razlike porasta tlaka i dinamičkog tlaka neposredno prije zatvaranja bušotine za mjerenje porasta tlaka) u polu-logaritamskom mjerilu (p_{ws} ili $\Delta p = \left(p_{ws} - p_{wf(\Delta t=0)} \right)$ u funkciji $\log\left[\left(t_p + \Delta t \right) / \Delta t \right]$) dati pravac nagiba $m = 1{,}151 qB\mu / 2\pi L\sqrt{k_y k_V}$, pa se propusnost u vertikalnoj ravnini, $\sqrt{k_y k_V}$, može izračunati prema istoj jednadžbi kao i u proizvodnom testu, tj. prema jednadžbi (2.37).

Nakon ranog radijalnog, sljedeći oblik bit će rani linearni protok između gornje i donje granice, tj. između krovine i podine ležišta (slika 16, slika 18). Analitičko rješenje jednadžbe difuzije za linearni protok prema horizontalnoj bušotini dano je jednadžbom

(2.41). I ovdje se, primjenom superpozicije u vremenu, analizu proizvodnog testa može prilagoditi testu porasta tlaka, pa jednadžba za analizu testa porasta tlaka tada glasi:

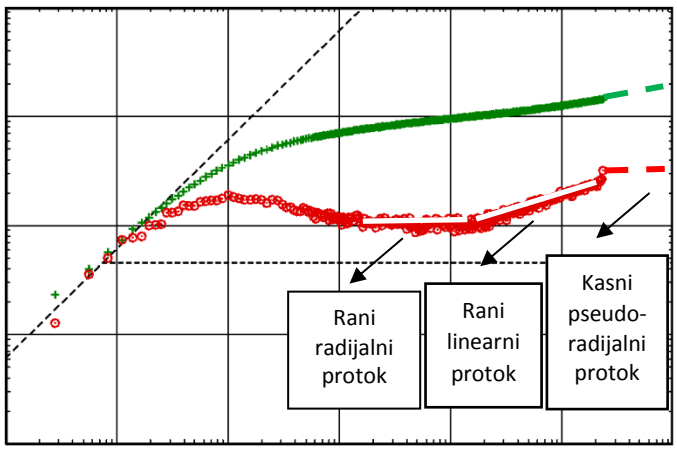
$$p_{ws} = p_i - \frac{qB}{Lh}\sqrt{\frac{\mu}{\pi\phi c_t k_y}\left(\sqrt{t_p + \Delta t} - \sqrt{\Delta t}\right)} \tag{2.46}$$

što znači da Kartezijev dijagram dinamičkog tlaka (ili razlike ležišnog i dinamičkog tlaka) u odnosu na drugi korijen vremena daje pravac, koji ima nagib:

$$m = \frac{qB}{Lh}\sqrt{\frac{\mu}{\pi\phi c_t k_y}} \tag{2.47}$$

Dakle, dijagram porasta tlaka ili razlike porasta tlaka i dinamičkog tlaka neposredno prije zatvaranja bušotine za mjerenje porasta tlaka, tj. p_{ws} ili $\Delta p = \left(p_{ws} - p_{wf(\Delta t=0)}\right)$ u funkciji $\left(\sqrt{t_p + \Delta t} - \sqrt{\Delta t}\right)$, dati će pravac nagiba danog jednadžbom (2.47), pa se s pomoću iste jednadžbe može izračunati propusnost k_y.

Derivacija tlaka za vrijeme ranog linearnog protoka jednaka je kao i u slučaju frakturirane bušotine pa, je na log-log dijagramu linearni protok je karakteriziran paralelnim pravcima čiji je nagib jednak ½. Derivacija je manja od samog tlaka za faktor 2 na linearnoj skali.



Slika 18: Ponašanje tlaka i derivacije za horizontalnu bušotinu (Houze et al., 2012)

Sljedeći režim protjecanja je kasni pseudo-radijalni protok, ekvivalentan onom u vertikalnoj bušotini (slika 18), gdje druga stabilizacija derivacije tlaka predstavlja uobičajeni 'kh', ako se ležište smatra izotropnim u horizontalnoj ravnini, tj. $(kh)_{kasni} = k_H h$. Primjenom

superpozicije u vremenu, temeljem jednadžbe (2.42), izvedena je Hornerova jednadžba za analizu testa porasta tlaka:

$$p_{ws} = p_i - \frac{qB\mu}{2\pi k_H h} 1{,}151 \times \log \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \tag{2.48}$$

Dakle, dijagram porasta tlaka (ili razlike porasta tlaka i dinamičkog tlaka neposredno prije zatvaranja bušotine za mjerenje porasta tlaka) u polu-logaritamskom mjerilu (p_{ws} ili $\Delta p = \left(p_{ws} - p_{wf(\Delta t=0)} \right)$ u funkciji $\log\left[\left(t_p + \Delta t \right) / \Delta t \right]$) dati će pravac nagiba $m = 1{,}151 qB\mu / 2\pi k_H h$, pa se horizontalna propusnost može izračunati prema istoj jednadžbi kao i u proizvodnom testu, tj. prema jednadžbi (2.43).

Kao konačni oblik protjecanja prema horizontalnoj bušotini, može se pojaviti kasni linearni protok, koji je također opisan prethodno. Dakle, isto kao i kod ranog linearnog protoka, Kartezijev dijagram dinamičkog tlaka (ili razlike ležišnog i dinamičkog tlaka) u odnosu na drugi korijen vremena daje pravac, koji ima nagib:

$$m = \frac{qB}{2x_e h} \sqrt{\frac{\mu}{\pi \phi c_t k_H}} \tag{2.49}$$

Primjenom superpozicije u vremenu, temeljem jednadžbe (2.44), jednadžba za analizu testa porasta tlaka glasi:

$$p_{ws} = p_i - \frac{qB}{2x_e h} \sqrt{\frac{\mu}{\pi \phi c_t k_H}} \left(\sqrt{t_p + \Delta t} - \sqrt{\Delta t} \right) \tag{2.50}$$

pa dijagram porasta tlaka ili razlike porasta tlaka i dinamičkog tlaka neposredno prije zatvaranja bušotine za mjerenje porasta tlaka, tj. p_{ws} ili $\Delta p = \left(p_{ws} - p_{wf(\Delta t=0)} \right)$ u funkciji $\left(\sqrt{t_p + \Delta t} - \sqrt{\Delta t} \right)$, daje pravac nagiba danog jednadžbom (2.49), s pomoću koje se može izračunati propusnost, k_H.

Navedena metodologija za analizu testova porasta tlaka u horizontalnim bušotinama (Economides i Nolte, 2000; Koščak Kolin et al., 2013) je pouzdana u određivanju propusnosti stijene, ukoliko test porasta tlaka traje dovoljno dugo da bi se razvio neki od oblika protoka. Međutim, u slabo propusnim ležištima je ovom metodologijom teško identificirati bilo koji od protoka. Stoga je svrha detaljnih opisa dosadašnjih istraživanja analize tlaka u vertikalnoj i horizontalnoj bušotini, koja se primjenjuje u proizvodnim i u

testovima porasta konvencionalnih ležišta nafte i plina, obrazložiti teoretsku podlogu za razvoj novih metoda analize testa porasta slabo propusnih ležišta u 3. i 4. poglavlju. Radijalni protok u vertikalnoj bušotini i jednadžbe koje se ovdje koriste su poveznica s pseudo-radijalnim protokom, čije postizanje je cilj novih istraživanja za određivanje propusnosti stijene u slabo propusnim ležištima, primjenom efektivnog radijusa bušotine.

Oblici protoka koji se pojavljuju kod horizontalne bušotine, analogno se interpretiraju u analizi tlaka i kod frakturiranih i kod višestruko frakturiranih horizontalnih bušotina u konvencionalnim ležištima nafte i plina. To znači da se i u ova dva tipa stimuliranih bušotina najprije definiraju odgovarajuće jednadžbe difuzije, temeljem kojih se određuju jednadžbe za analizu tlaka svakog pojedinog oblika protoka, iz kojih se zatim sličnom metodologijom određuje propusnost stijene. Iz tog razloga su proizvodni modeli frakturirane i višestruko frakturirane bušotine u nastavku izneseni ukratko, i to samo u onim dijelovima koji su teoretski povezani s analogijom razvoja nove metode u 4. poglavlju.

2.3. Analiza tlaka frakturirane bušotine

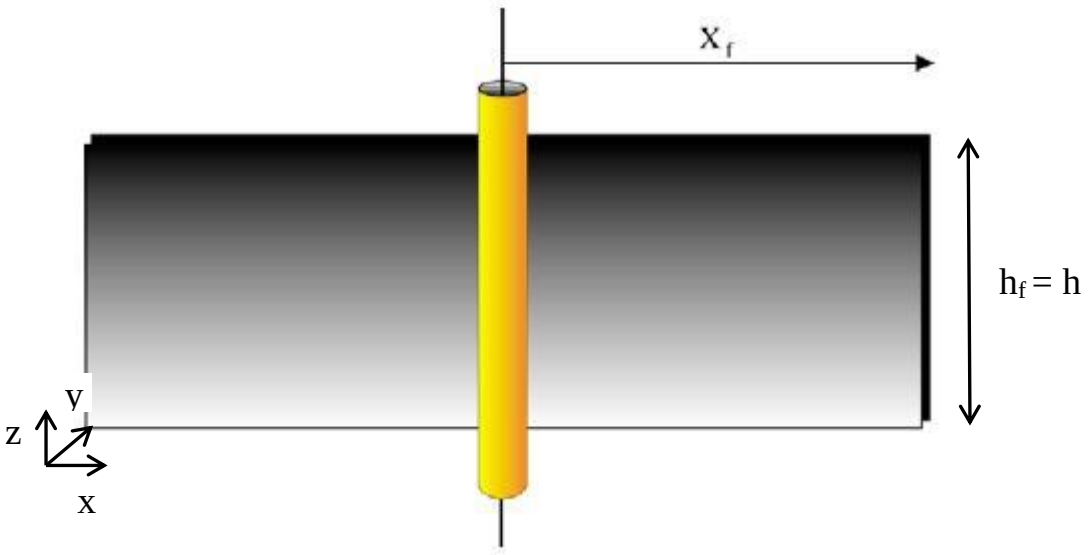
2.3.1. Model protoka kroz vertikalnu pukotinu

Ako je idealizirano homogeno i izotropno horizontalno ležište, presječeno vertikalnom pukotinom, tada se pritjecanje prema vertikalnoj bušotini, smještenoj u ishodištu pukotine može opisati jednadžbom difuzije za dvodimenzionalni linearni protok (protok kroz pukotinu) i jednadžbom difuzije za jednodimenzionalni linearni protok (protok u ležištu). Te dvije parcijalne diferencijalne jednadžbe međusobno su povezane rubnim uvjetima, a ovisno o definiciji početnih i rubnih uvjeta, postoje rješenja za konstantan protok na unutarnjoj granici ležišta i za konstantan tlak na unutarnjoj granici ležišta. Numerička rješenja dana su u obliku tipskih krivulja, dok su za pojedine vremenske segmente:

- linearni protok u pukotini;
- bilinearni protok u pukotini;
- linearni protok u ležištu;
- pseudo-linearni protok u ležištu i
- pseudo-radijalni protok u ležištu,

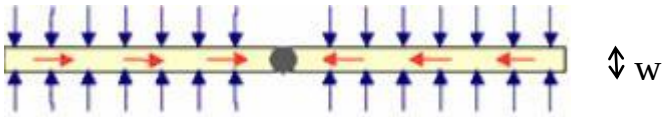
razvijena i približna analitička rješenja. Sva rješenja daju funkcionalnu ovisnost bezdimenzionalnog pada tlaka, odnosno bezdimenzionalne kumulativne proizvodnje o bezdimenzionalnom vremenu proizvodnje i bezdimenzionalnoj vodljivosti pukotine.

Primjer idealizirane vertikalne pukotine prikazan je na slici 19, gdje se radi o izotropnom, homogenom, horizontalnom, vertikalno ograničenom, a lateralno neograničenom prikazu ležišta, uz pretpostavku da sadrži zanemarivo stlačiv fluid (tj. konstantne stlačivosti, c) i viskoznosti, μ. Šupljikavi medij ima propusnost, k, poroznost, ϕ, debljinu, h i početni ležišni tlak, p_i, a bušotinu presijeca simetrična, potpuno penetrirajuća vertikalna pukotina ($h_f = h$), poluduljine, x_f, širine, w, propusnosti, k_f, šupljikavosti, ϕ_f i ukupne stlačivosti, c_{ft}. Svojstva ležišta i pukotine su neovisna o tlaku, a za protok se pretpostavlja da je Darcyjev, da su gradijenti tlaka mali, gravitacijski efekti te efekti močivosti i kapilarnih sila zanemarivi, te da fluid utječe u bušotinu samo kroz pukotinu. Protok fluida uz ove pretpostavke može biti opisan jednadžbom difuzije u dvije dimenzije, s tim da se sustav podijeli u dva protočna područja - pukotinu i ležište (Kanfar i Clarkson, 2018; Cinco-Ley et al., 1978).



Slika 19. Vertikalna pukotina s bušotinom u središtu (Houze et al., 2012)

Pukotinu se može prikazati trodimenzionalnim linearnim modelom u kojem nema protoka u smjeru osi z ($\rho v_z = 0$, $\Delta \rho v_z = 0$), ali su dimenzije modela promijenjene tako da je $\Delta y = w$, $\Delta z = h$. Takav dvodimenzionalni protok prikazan je na slici 20, gdje je bušotina predstavljena plohom, površine wh.



Slika 20. Model protjecanja fluida kroz pukotinu (Houze et al., 2012)

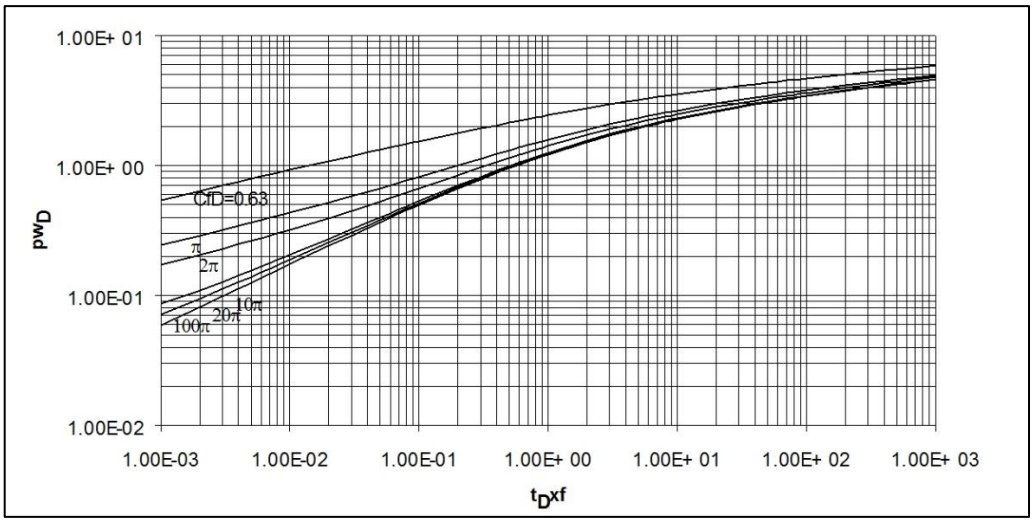
Maseni utok fluida u pukotinu u smjeru osi *y* odvija se kroz dvije stjenke pukotine, ukupne površine $2\Delta xh$, brzinom, v_y, dok je izlaz jednak nuli. Uvođenjem Darcyjevog zakona za protok u smjeru osi *y* (v_y), iz jednadžbe kontinuiteta za dvodimenzionalni linearni protok, slijedi jednadžba difuzije za protok kroz pukotinu (Economides i Nolte, 2000). Jednodimenzionalni linearni model, u kojem fluid teče brzinom, v_y, okomito na pukotinu, predstavljenu plohom visine, *h*, i duljine, $2x_f$, opisuje protok fluida u ležištu. Dvije parcijalne diferencijalne jednadžbe međusobno su povezane početnim i rubnim uvjetima, a ovisno o njihovoj definiciji razvijena su dva rješenja, od kojih se u analizi testa porasta tlaka koristi model frakturirane bušotine s konstantnim protokom na unutarnjoj granici ležišta.

U tom modelu su za frakturiranu bušotinu u neograničenom ležištu, koja proizvodi konstantnim protokom, početni i rubni uvjeti definirani tako da je početni tlak u pukotini jednak ležišnom tlaku, da se utok u bušotinu odvija samo kroz pukotinu ukupne površine, $2wh$, prema Darcyjevom zakonu i da kroz vrh pukotine nema utoka u pukotinu (Cinco-Ley et al., 1978).

Dvije jednadžbe difuzije riješene su semianalitički za tlak u pukotini, p_{fD}, odnosno za tlak u bušotini, p_{wD}, koji je jednak tlaku u pukotini kod $x_D = 0$, a pritom je bezdimenzionalni tlak u bušotini definiran kao:

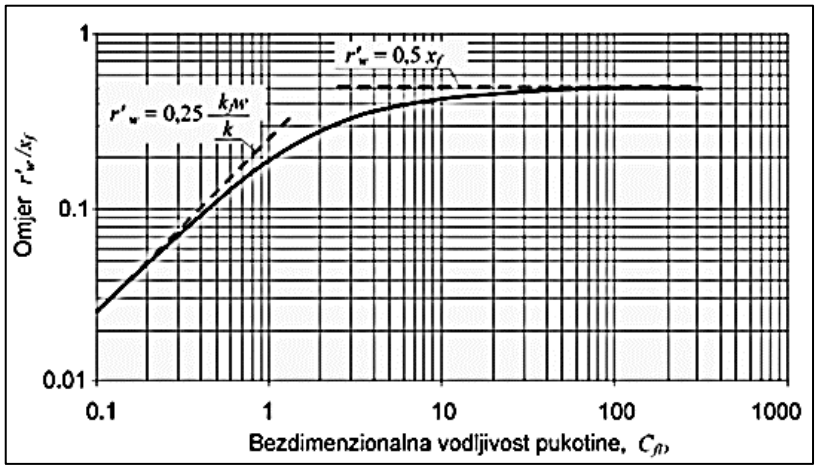
$$p_{wD} = \frac{2\pi kh\left(p_i - p_{wf}\right)}{qB\mu} \tag{2.51}$$

Grafički prikaz rješenja dan je u obliku tipskih krivulja na slici 21, dok su približna analitička rješenja za pojedine oblike protjecanja, korisna u provjeri numeričkih rješenja. Ova rješenja su osnova za analizu pada ili porasta tlaka u proizvodnom testu.



Slika 21. Tipske krivulje za frakturiranu bušotinu u neograničenom ležištu, s konstantnim protokom na unutarnjoj granici ležišta (Cinco-Ley et al., 1978)

Matematički opis protoka iz ležišta u frakture svih vodljivosti se opisuje kao slučaj u kojem se nakon dovoljno dugog perioda bušotinu može opisati kao 'proširenu bušotinu' s efektivnim radijusom (Daneshy, 2010; Prats et al., 1962;), koji se može odrediti prema jednadžbama na slici 22.



Slika 22. Odnos bezdimenzionalnog efektivnog radijusa bušotine i bezdimenzionalne vodljivosti vertikalne frakture

Drenažni radijus kod ovakvog protoka može se pretpostaviti da je jednak u svim horizontalnim smjerovima, tj. da se radi o pseudo-radijalnom protoku kao u slučaju

vertikalne bušotine, što predstavlja dobru pretpostavku ukoliko je odnos dimenzije pukotine malen u odnosu na drenažni radijus. Što je veća vodljivost fraktura, to kasnije dolazi do uspostavljanja ovakvog tipa protoka. Fizikalno, uspostava pseudo-radijalnog protoka znači kraj transformacije pravokutnog oblika crpljenja (linearni protok), preko eliptičnog (prijelazni oblik) u gotovo radijalni oblik. Površina crpljenja u biti ne postaje potpuno kružna, ali ju se za praktične svrhe takvom može smatrati. To znači da se jednadžbe izvedene za radijalni protok mogu koristiti za pseudo-radijalni protok, uz zanemarivu grešku.

2.3.2. Primjena modela frakturirane bušotine u analizi testa porasta tlaka

Pseudo-radijalni protok frakturirane bušotine razvit će se tek kad bezdimenzionalno vrijeme dosegne vrijednost $t_{Dxf} \geq 3$, pa se uspostava neograničeno djelujućeg radijalnog protoka može se očekivati tek nakon tog vremena. Tek tada bi bilo moguće primijeniti standardnu analizu za radijalni protok, tj. metodu polu-logaritamskog prikaza tlaka za proizvodni test, odnosno Hornerovu analizu za porast tlaka. Stvarno vrijeme potrebno za uspostavu pseudo-radijalnog protoka obzirom na definiciju bezdimenzionalnog vremena za frakturiranu bušotinu, t_{Dxf} , može se izračunati prema izrazu (Economides, 1984):

$$t = 3\frac{\phi\mu c_t x_f^2}{k} \tag{2.52}$$

Vrijeme uspostave pseudo-radijalnog protoka također je određeno svojstvima ležišta i ležišnog fluida, te duljinom pukotine, pa uzevši neke tipične vrijednosti varijabli za plinsko ležište, kao što su $\phi = 10\%$, $\mu = 0{,}02\times10^{-3}$ Pa×s, $c_t = 2{,}5\times10^{-8}$ Pa i $x_f = 100$ m, ono za različite propusnosti iznosi (tablica 1):

Tablica 1. Minimalno vrijeme potrebno za početak pseudo-radijalnog protoka u frakturiranoj naftnoj bušotini (Economides, 1984).

k, 10^{-3} µm^2	**100**	**10**	**1**	**0,1**	**0,01**
t, dana	0,174	1,74	17,38	173,75	1737,5

Iz tablice je vidljivo, da se u analizi testa porasta tlaka slabo propusnih ležišta ne može očekivati pojava početka pseudo-radijalnog oblika protoka u periodu koje bi praktički bilo izvedivo, pa se stoga razvijaju nove metode za njihovu interpretaciju. One se, osim na

FB odnose i na VFHB, u kojima je maksimalno povećana kontaktna površina između ležišta i bušotine.

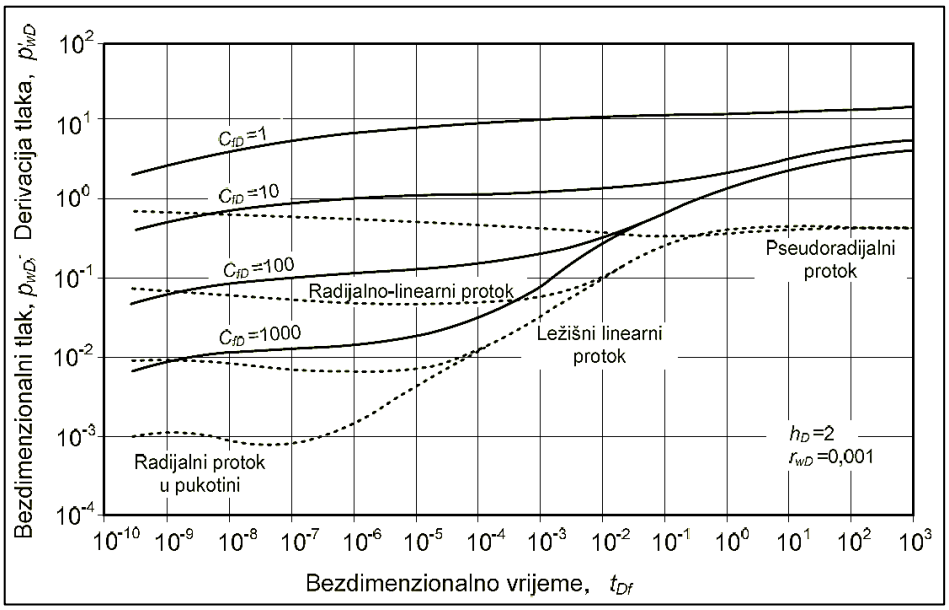
2.4. Analiza tlaka višestruko frakturirane horizontalne bušotine (VFHB)

U svrhu poboljšanja proizvodnosti ležišta manje propusnosti, s nepovoljnom vertikalnom anizotropijom propusnosti, horizontalnu bušotinu se hidraulički frakturira (Denney, 2009; Lin, 2011; Themig, 2011; Meyer et al., 2010). Ovisno o orijentaciji horizontalnog dijela bušotine u odnosu na orijentaciju minimalnog horizontalnog naprezanja u ležištu, hidraulički stvorena pukotina može nastati uzdužno ili poprečno u odnosu na bušotinu (slika 1). Poprečne frakture će nastati ako je horizontalni dio bušotine izbušen u smjeru minimalnog horizontalnog naprezanja, te će se rasprostirati u dizajniranom broju, uzduž osi bušotine, na njenim perforiranim dijelovima. U slučaju da je horizontalni dio bušotine izbušen okomito na smjer minimalnog horizontalnog naprezanja, stvorit će se jedna ili više uzdužnih pukotina, koje su paralelne s osi bušotine. U skladu s tim su razvijena i dva matematička modela frakturirane horizontalne bušotine: model horizontalne bušotine presječene poprečnom pukotinom i model horizontalne bušotine presječene uzdužnom pukotinom. S obzirom da se razvoj novih metoda za analizu testa porasta tlaka u 3. i 4. poglavlju većinom temelji na VFHB s poprečnim frakturama, u nastavku su najprije opisane osnovne proizvodne karakteristike modela s jednom porečenom frakturom, koji se analogno primjenjuje na bušotinu s više fraktura.

2.4.1. Model protoka kroz VFHB

Za izvode osnovnih jednadžbi pretpostavljeno je izotropno i neograničeno ležište u svim smjerovima. Ležišni fluid je male i konstantne stlačivosti, c, i viskoznosti, μ, a ležišna stijena ima propusnost, k, šupljikavost, ϕ i početni ležišni tlak, p_i. Horizontalna bušotina je presječena pukotinom koja ima propusnost, k_f, širinu, w, šupljikavost, ϕ_f i ukupnu stlačivost, c_{ft}. Pretpostavljeno je da je poprečna pukotina ograničene vodljivosti i kružnog oblika s vanjskim radijusom, r_f i unutarnjim radijusom, r_w. U matematičkom modelu korišten je cilindrični koordinatni sustav u kojem je os z okomita na stjenke pukotine, pa je središte pukotine, po njenoj širini, smješteno kod $z = 0$. Analogno postupku za frakturiranu vertikalnu bušotinu (Cinco-Ley et al., 1978) izvedene su jednadžbe difuzije za protok u pukotini prema bušotini i za protok u ležištu prema pukotini (Larsen i Hegre, 1991; Soliman

et al., 1990). Za sustav poprečno frakturirane horizontalne bušotine u neograničenom ležištu, rješenja su dana grafički, u obliku tipskih krivulja, te analitički za pojedine oblike protjecanja (Larsen i Hegre, 1994). Log-log dijagram bezdimenzionalnog tlaka, i njegove derivacije po prirodnom logaritmu bezdimenzionalnog vremena, dan je na slici 23, za vrijednosti bezdimenzionalne vodljivosti pukotine, C_{fD}, u rasponu od 1 do 1000. Bezdimenzionalni radijus bušotine je r_{wD} = 0,001 i bezdimenzionalna debljina ležišta h_D = 2.



Slika 23: Bezdimenzionalni tlak i njegova derivacija u funkciji bezdimenzionalnog vremena za horizontalnu bušotinu presječenu poprečnom pukotinom (Larsen i Hegre, 1994)

Na slici se može vidjeti da prijelazni period uključuje nekoliko oblika protoka. U početku se javlja radijalni protok u pukotini, koji je karakteriziran konstantnom derivacijom tlaka po prirodnom logaritmu vremena. Nakon toga sustav može pokazivati radijalno-linearni protok, također karakteriziran konstantnom derivacijom tlaka, ili ležišni linearni protok karakteriziran derivacijom tlaka koja pada na pravac nagiba 1/2. Ležišni linearni protok će se razviti samo za pukotine velike vodljivosti (C_{fD} > 100), a njegovo trajanje je proporcionalno bezdimenzionalnoj vodljivosti pukotine. Za vrijednosti C_{fD} manje od 100 redovito će se razviti radijalno-linearni protok. U svim slučajevima sustav će doseći period pseudo-radijalnog protoka, s konstantnom derivacijom tlaka jednakom 0,5, kod t_{Df} = 3.

Radijalni protok u pukotini zbiva se kod vrlo malih vrijednosti bezdimenzionalnog vremena, koje korespondiraju s realnim vremenima manjim od nekoliko sekunda, dok je

radijalno-linearni nazvan zato što se kod ovog oblika istodobno zbiva radijalni protok u pukotini prema bušotini i linearni protok u ležištu prema pukotini. Analogno slučaju frakturirane vertikalne bušotine, linearni protok u ležištu prema vertikalnoj pukotini opisan je modelom vertikalne pukotine neograničene vodljivosti (Gringarten et al., 1974). Tijekom pseudo-radijalnog protoka, ponašanje bezdimenzionalnog tlaka je slično rješenju za radijalni protok u homogenom ležištu, sa skin faktorom kao posljedicom utjecaja pukotine. I ovdje je uveden koncept efektivnog radijusa bušotine, r_w', koji je definiran tako da uključuje skin faktor, s, zbog utjecaja pukotine (Prats et al., 1962), a u bezdimenzionalnom obliku glasi:

$$r'_{wD} = \frac{r'_w}{r_f} \tag{2.53}$$

Bezdimenzionalni efektivni radijus bušotine, r'_{wD}, je funkcija bezdimenzionalne vodljivosti pukotine, C_{fD}, bezdimenzionalnog radijusa bušotine, r_{wD}, i bezdimenzionalne debljine ležišta, h_D. Zato se, tijekom pseudo-radijalnog protoka, frakturirana horizontalna bušotina ponaša kao nefrakturirana s bezdimenzionalnim efektivnim radijusom bušotine danim jednadžbom (2.53).

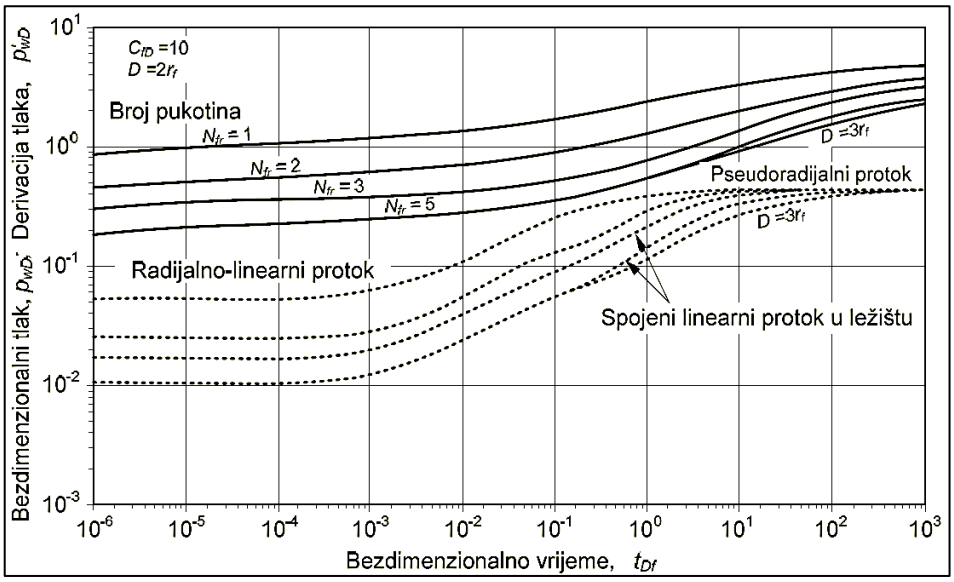
Efektivni radijus frakturirane horizontalne bušotine, r_w', značajno ovisi o bezdimenzionalnoj vodljivosti pukotine, zbog ograničenog kontakta između bušotine i pukotine (Antolović i Čikeš, 2009). U pravilu, bezdimenzionalna vodljivost pukotine treba biti veća od 10, a bezdimenzionalni efektivni radijus horizontalne bušotine presječene pukotinom kružnog oblika glasi:

$$r'_{wD} = \frac{r'_{wD\max}}{e^{\frac{h_D}{2C_{fD}}\left(\ln\frac{4A_f}{e^{\gamma}C_{Af}r_w^2}\right)}} \tag{2.54}$$

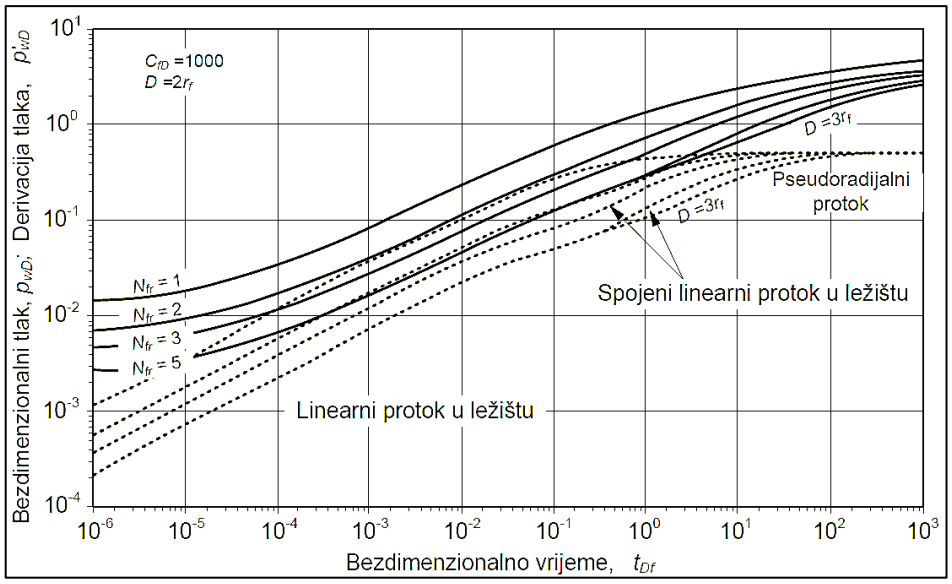
gdje je A_f površina pukotine, $\gamma = 0{,}57722$ je Eulerova konstanta, a C_{Af}, *je* faktor oblika za pukotinu. Faktor, C_{Af}, ovisi o obliku pukotine i smještaju bušotine u ravnini pukotine i identičan je Dietzovom faktoru oblika za različite oblike površine crpljenja vertikalnih bušotina, C_A.

Tijekom rane protočne faze, višestruko frakturirana horizontalna bušotina pokazuje iste protočne periode kao i jednostruko frakturirana bušotina. Osim ako pojedine pukotine nisu puno kraće od njihove međusobne udaljenosti, interferencija između pukotina će se zbiti prije nego što se razvije pseudo-radijalni protok oko svake pukotine. Prije nego što se dogodi

interferencija, pojedinačne pukotine crpe samostalne dijelove ležišta i mogu se prikladno analizirati pretpostavljajući jednu pukotinu, s tim da se ukupni protok podijeli s brojem pukotina. Međutim, u višestruko frakturiranoj bušotini može se pojaviti i spojeni linearni protok u ležištu, karakteriziran linearnim protokom iz ležišta u skupinu pukotina. Takav sustav pukotina prouzročit će ponašanje tlaka u prijelaznom periodu slično onom velike uzdužne pukotine. U slučaju poprečnih pukotina, smjer protoka je različit tijekom linearnog protoka i tijekom spojenog linearnog protoka u ležištu, dok je u slučaju više uzdužnih pukotina, smjer protoka isti tijekom oba ova perioda. Ne dosegnu li se granice ležišta tijekom ova dva perioda, razvit će se pseudo-radijalni protok. Tijekom spojenog linearnog protoka u ležištu, kao i tijekom pseudo-radijalnog perioda, u analizi ponašanja tlaka koristi se ukupni protok bušotine. Opće ponašanje horizontalne bušotine presječene s nekoliko poprečnih pukotina ograničene vodljivosti ilustrirano je na slikama 24 i 25. Log-log dijagram bezdimenzionalnog tlaka, p_{wD}, i njegove derivacije, p'_{wD}, prikazan je za bušotinu s jednom i više (2, 3 i 5) poprečnih pukotina. Bezdimenzionalni radijus bušotine je 0,001, a promjer pukotina je jednak debljini ležišta. Udaljenost između pukotina je identična promjeru pukotina ($D = 2r_f$), osim za bušotinu s pet pukotina, gdje je ilustriran učinak povećanja udaljenosti na $D = 3r_f$. Bezdimenzionalna vodljivost pukotina, C_{fD}, je 10, odnosno 1000, dok su ostali parametri isti u oba slučaja.



Slika 24: Bezdimenzionalni tlak i njegova derivacija u funkciji bezdimenzionalnog vremena za horizontalnu bušotinu presječenu s više poprečnih pukotina osrednje vodljivosti (Larsen i Hegre, 1994)



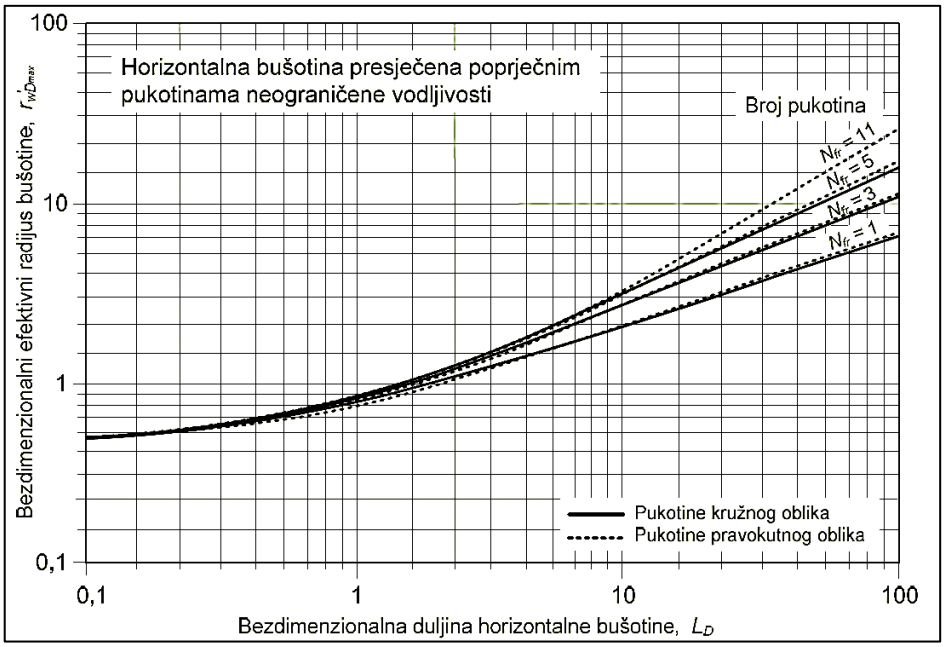
Slika 25: Bezdimenzionalni tlak i njegova derivacija u funkciji bezdimenzionalnog vremena za horizontalnu bušotinu presječenu s više poprečnih pukotina velike vodljivosti (Larsen i Hegre, 1994)

Tijekom radijalno-linearnog protoka u slučaju slabo vodljivih pukotina (slika 24), te tijekom linearnog protoka u ležištu u slučaju dobro vodljivih pukotina (slika 25), bezdimenzionalni tlak je proporcionalan broju pukotina. Pukotine crpe pojedine dijelove ležišta, pa je pad tlaka u višestruko frakturiranoj horizontalnoj bušotini s pet pukotina jednak upravo 1/5 pada tlaka ostvarenog u horizontalnoj bušotini s jednom pukotinom. Za višestruko frakturiranu horizontalnu bušotinu s najmanje tri pukotine, može se razviti spojeni linearni protok u ležištu. Također se vidi da se povećanjem udaljenosti između pukotina interferencija pukotina odgađa. U slučaju dugačke horizontalne bušotine s nekoliko pukotina, pseudo-radijalni protok se može razviti oko svake pukotine. Ipak, njegov početak je odgođen u dugim horizontalnim bušotinama s nekoliko pukotina. Taj početak ne uvjetuje broj pukotina nego udaljenost između dviju krajnjih pukotina. Za jednu pukotinu, pseudo-radijalni protok može početi za nekoliko sati ili dana, dok se u višestruko frakturiranoj bušotini pseudo-radijalni protok može javiti tek za nekoliko mjeseci ili čak za nekoliko godina.

Kao i za horizontalnu bušotinu presječenu s jednom poprečnom pukotinom (jednadžba 2.54), bezdimenzionalni efektivni radijus višestruko frakturirane horizontalne bušotine može se aproksimirati izrazom:

$$r'_{wD} = \frac{r'_{wD\max}}{e^{\frac{h_D}{2C_{fD}N}\left(\ln\frac{4A_f}{e^{\gamma}C_{Af}r_w^2}\right)}} \qquad (2.55)$$

gdje je, r'_{wDmax}, dan kao funkcija bezdimenzionalne duljine horizontalne bušotine, L_D, u dijagramu na slici 26.

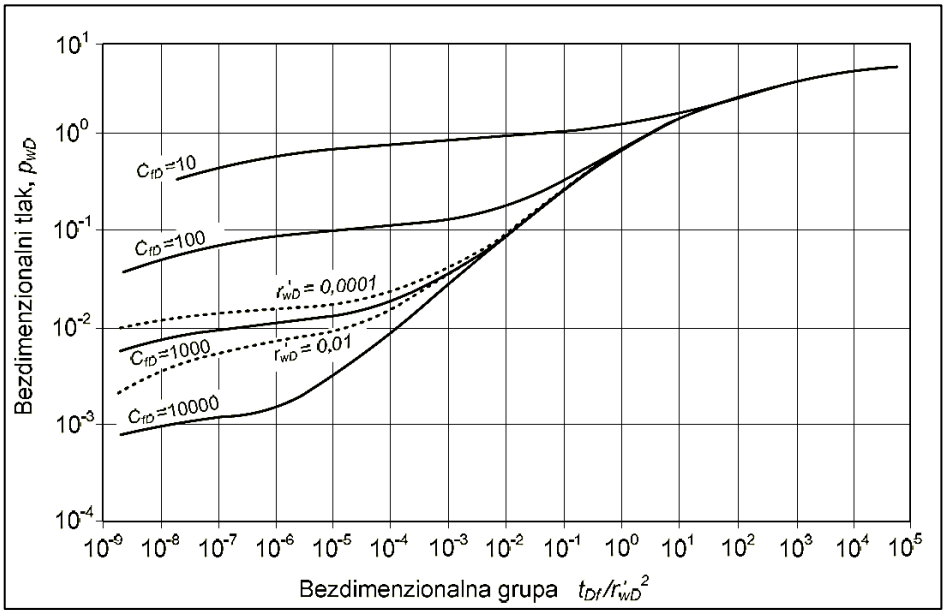


Slika 26: Bezdimenzionalni efektivni radijus u funkciji bezdimenzionalne duljine horizontalne bušotine presječene s više poprečnih pukotina (Hegre i Larsen, 1994)

Za kratke horizontalne bušotine efektivni radijus bušotine, r_w', (jednadžba 2.53) je neovisan o broju pukotina. Horizontalni dio bušotine treba imati određenu duljinu da bi povećavanje broja pukotina bilo svrhovito. Na slici su također prikazane vrijednosti, r'_{wDmax}, za horizontalne bušotine presječene višestrukim pukotinama pravokutnog oblika. Primjećuje se samo mala razlika u krivuljama za pukotine kružnog i pravokutnog oblika. Vrijednosti, r'_{wDmax}, za horizontalnu bušotinu presječenu pravokutnim poprječnim pukotinama su neovisne o h_D. Zato se s pomoću dijagrama na slici 26 i jednadžbe (2.55) može izračunati proizvodnost horizontalne bušotine presječene višestrukim pukotinama, ograničene vodljivosti, neovisno o obliku pukotine, ako pukotine prodiru cijelom debljinom ležišta.

2.4.2. Primjena modela VFHB u analizi testa porasta tlaka

Temeljem rješenja jednadžbe difuzije za model horizontalne bušotine s poprečnom pukotinom identificirano je nekoliko oblika protjecanja, za koje su dana analitička rješenja bezdimenzionalnog tlaka u bušotini. Primjenom načela superpozicije u vremenu, analogno radijalnom protjecanju u slučaju vertikalne bušotine, analizu proizvodnog testa može se prilagoditi testu porasta tlaka. U prijelaznom periodu prema pseudo-radijalnom protoku, ponašanje bezdimenzionalnog tlaka je specifično za pukotine veće vodljivosti. To je vidljivo na slici 27, gdje je u log-log dijagramu prikazan bezdimenzionalni tlak, p_{wD}, u funkciji omjera bezdimenzionalnog vremena i kvadrata bezdimenzionalnog efektivnog radijusa bušotine. Glavno svojstvo ovog dijagrama jest, da je za sve vrijednosti bezdimenzionalnog efektivnog radijusa bušotine, r'_{wD}, i bezdimenzionalne vodljivosti pukotine, C_{fD}, veće od 10, ponašanje tlaka tijekom pseudo-radijalnog protoka dano jednom krivuljom. Stoga se ovaj dijagram može koristiti kao tipska krivulja u analizi tlaka kad on djelomično pada u pseudo-radijalno područje.



Slika 27: Bezdimenzionalni tlak u funkciji omjera bezdimenzionalnog vremena i bezdimenzionalnog radijusa bušotine s poprečnom pukotinom (Larsen i Hegre, 1994)

Kao što je izneseno kod proizvodnih modela, višestruko frakturirana horizontalna bušotina pokazuje slične protočne periode kao i jednostruko frakturirana bušotina, pa je analiza pseudo-radijalnog protoka ista kao i u slučaju jednostruko frakturirane bušotine, uz

napomenu da je efektivni radijus dodatno funkcija broja pukotina i udaljenosti među njima (jednadžba 2.55).

U sljedećem poglavlju su navedeni slučajevi kada opisanu metodologiju za analizu testova porasta tlaka u VFHB nije moguće primijeniti u slabo propusnim ležištima, jer bi trajanje testa za postizanje pseudo-radijalnog protoka trebalo biti i do nekoliko godina, što bi ekonomski bilo neisplativo (Barree et al., 2015; Soliman et al. 2003). Stoga su, prije razvoja nove metode, najprije prikazani suvremeni pristupi u literaturi za rješavanje ovog problema.

3. ANALIZA TESTA PORASTA TLAKA SLABO PROPUSNIH LEŽIŠTA

U dosadašnjem razvoju metoda za analizu testova porasta tlaka u plinskim bušotinama slabo propusnih ležišta postoje različiti pristupi u literaturi (Sun i Schechter, 2018; Cheng et al., 2017; Ishkin et al., 2016; Kim i Lee, 2015; Kuchuk et al., 2015; Kuchuk i Biryukov, 2014; Wang, 2013; Tabatabaie et al., 2013; Slimani i Tiab, 2008; Gringarten, 2008; Zeng i Zhao, 2007), ali niti u jednom nije ostvaren cilj jedinstvene mogućnosti primjene na sva ležišta. Stoga su ovdje odabrane tri metode koje su njihovi autori razvili u najvećem opsegu u odnosu na ostale pristupe, te su izneseni znanstveni doprinosi i nedostatci u primjeni svake od njih.

3.1. Metoda prema autoru Lougheedu i suradnicima

U radu iz 2013. godine, Lougheed je sa suradnicima objavio detaljnu analizu testa porasta tlaka provedenog u plinskoj bušotini, koja se nalazi u slabo propusnom ležištu šejla Eagle Ford u Texasu. Radi se o višestruko frakturiranoj horizontalnoj bušotini, a očekivani iznos propusnosti u ovom ležištu je u rangu od nekoliko mikro Darcyja (1 μD = 1E-18 m^2). Analizom testa porasta provedenog u trajanju od punih mjesec dana željelo se razlučiti točnost interpretacije koja se odnosi na pojavljivanje ranog radijalnog protoka ili ukazati na mogućnost krive interpretacije ovog oblika protoka u ovakvom proizvodnom sustavu bušotine i ležišta. U nekim objavljenim modelima u literaturi, temeljenim na sličnim sustavima, pretpostavlja se da do ranog radijalnog protoka vrlo vjerojatno neće doći, jer to ne bi bilo u skladu s velikim brojem fraktura i geometrijom tipične višestruko frakturirane horizontalne bušotine. Kako bi to dokazali ili opovrgnuli, autori su najprije postavili analizu tlaka u bušotini za proizvodni model. Zatim su je prilagodili testu porasta tlaka, što je uobičajena procedura za svaki pojedini tip bušotine, kao što je navedeno u prethodnom poglavlju.

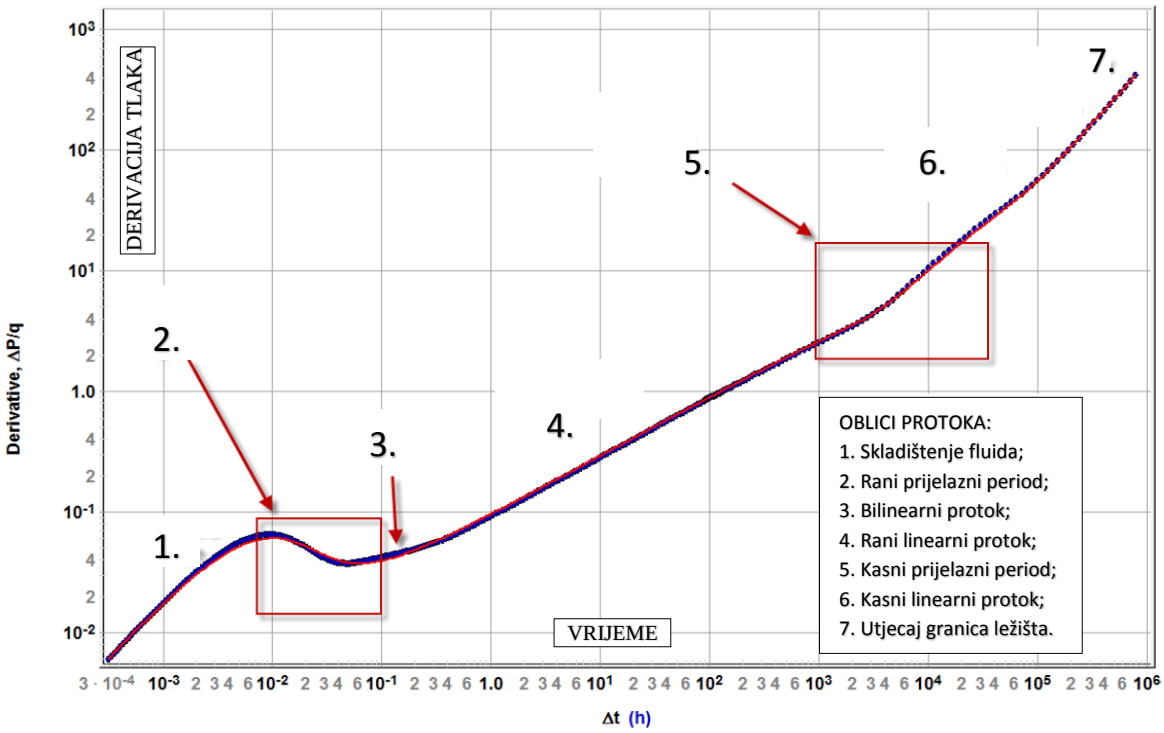
S obzirom da su autori u radu iznesli gotovo sve podatke o testu porasta tlaka i o petrofizikalnim svojstvima ležišta, kao i ostala fizikalna svojstva fluida i glavne karakteristike bušotine, ovaj test odabran je za razvoj nove metode u 4. poglavlju. Iz tog razloga su svi ulazni podaci navedeni u tablici 2 i u prilogu 1, gdje su preračunati u SI sustav jedinica. Dijagrami iz Lougheedovog rada (slike 28 do 31), ostavljeni su u originalnim jedinicama zajedno s izlaznim podacima. Kod opisa metode je dijagrame potrebno

uspoređivati, a za mogućnost kompletne pretvorbe jedinica bi trebala uporaba softvera na osnovu kojeg su autori postavili svoj model bušotine i analizu krivulje porasta tlaka.

Od mogućih oblika protoka u ovoj višestruko frakturiranoj horizontalnoj bušotini, u simulacijskom modelu su predvidjeli 9 mogućnosti. Za svaki oblik ilustriran je nagib krivulje derivacije tlaka u log-log dijagramu, kao što je to slučaj kod originalnog Bourdet log-log dijagrama (slika 46a). Sličnu sistematizaciju oblika protoka koristi i Bahrami sa suradnicima (2013) kod razvoja svoje metode (slika 32), dok prema nešto izmijenjenoj raspodjeli ovisnosti protoka o nagibima radi i softver za analizu testa porasta tlaka Saphir (DDA book, 2017). Kako je fizikalno značenje pojedinih oblika protoka već opisano u 2. poglavlju, a gotovo svi oblici su vrlo detaljno ilustrirani na slici 32, ovdje je samo nabrojano svih 9 mogućnosti. U zagradi je iznos nagiba, *m*, za svaki pojedini protok:

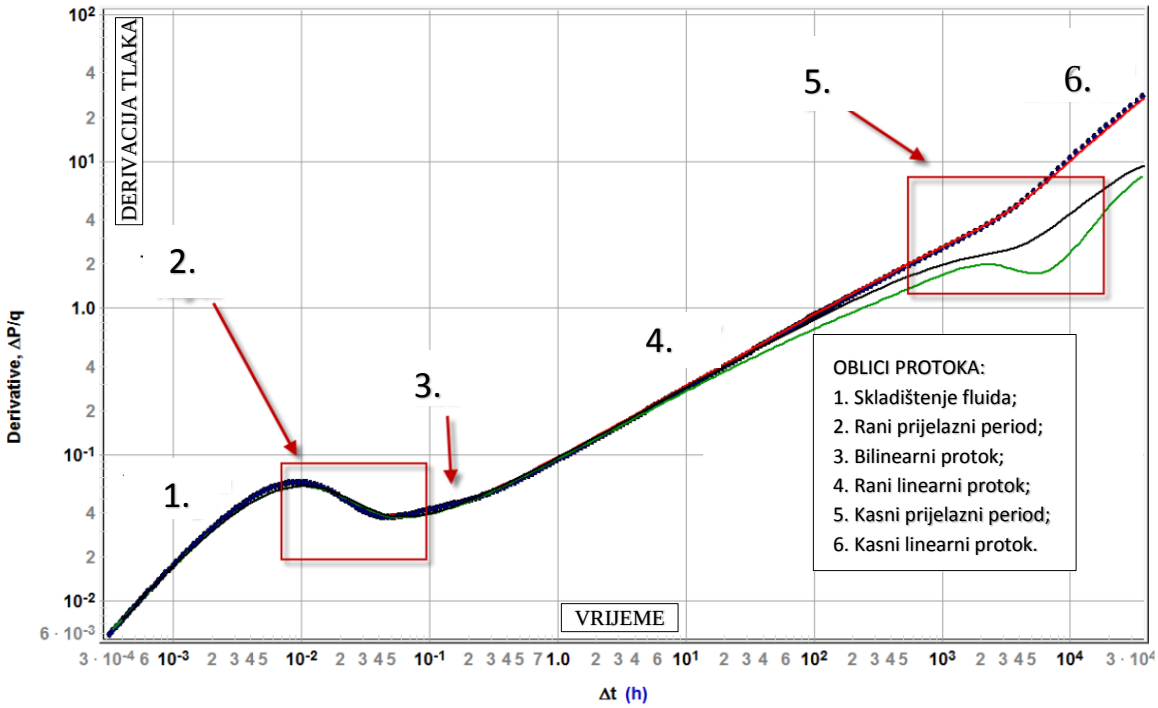
1. period skladištenja fluida ($m = 1$);
2. radijalni kroz frakture ($m = 0$);
3. linearni kroz frakture ($m = 1/2$);
4. bilinearni ($m = 1/4$);
5. rani linearni prema frakturama ($m = 1/2$);
6. rani radijalni prema frakturama ($m = 0$);
7. kasni linearni prema cijeloj bušotini ($m = 1/2$);
8. kasni pseudo-radijalni prema cijeloj bušotini ($m = 0$);
9. utjecaj granice ležišta ($m = 1$).

Autori zatim generiraju pretpostavljen odziv krivulje tlaka za proizvodni test, uporabom vlastitog softvera u kojem je proizvodni model simuliran temeljem tzv. trilinearnog modela protoka (Brown et al., 2009). Osnovna pretpostavka ovog modela je jednolika propusnost stijene u svim smjerovima ležišta, te se ne predviđa razvijanje niti jednog od radijalnih protoka, navedenih prethodno pod brojevima 2, 5 i 8. Derivacija generirane krivulje tlaka prema ovom modelu prikazana je na slici 28, gdje je izdvojeno 7 različitih mogućnosti. Pravokutnicima su pod brojevima 2 i 5 uvedeni rani i kasni prijelazni periodi, koji zamjenjuju radijalne protoke, dok se pseudo-radijalni protok pod brojem 8 zanemaruje. Isto tako nije predviđen niti linearni protok pod brojem 3, tako da se u ovoj simulaciji predviđa 5 mogućih oblika protoka i 2 prijelazna perioda. U ovih 5 mogućnosti ulaze samo 3 linearna protoka, navedeni pod rednim brojevima 4, 5 i 7, pa se zato odabrani simulacijski model i zove trilinearni. Ostale dvije od 5 mogućnosti odnose se na vrijeme skladištenja, koje se na derivaciji krivulje tlaka interpretira nagibom 1, i na završni period krivulje, gdje se utjecaj granice ležišta na derivaciji također odražava kroz nagib 1.



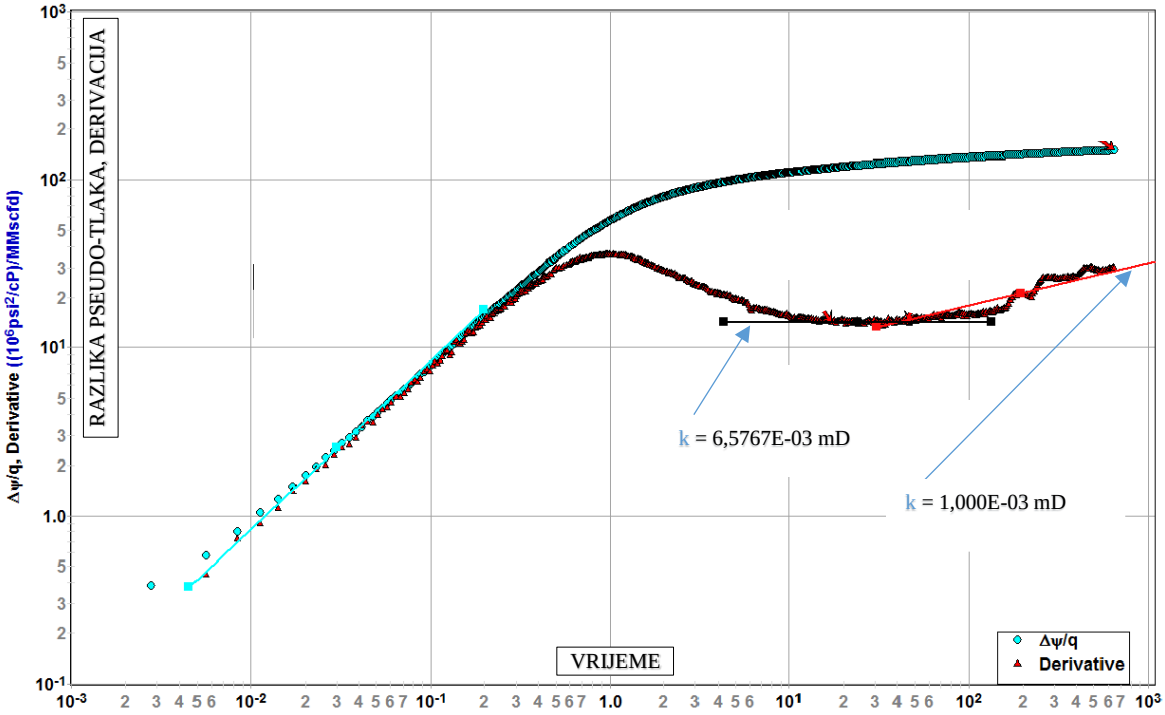
Slika 28: Simulacija derivacije krivulje tlaka za proizvodni model višestruko frakturirane horizontalne bušotine (Lougheed et al., 2013)

Na slici 29, autori uz krivulju tlaka proizvodnog testa, uvode i dvije simulacije odziva derivacije krivulje testa porasta tlaka, za koje se pretpostavlja da najprije slijedi iste nagibe kao i kod proizvodnog testa sve do kasnog prijelaznog područja (broj 5). Nakon toga se modelom analiziraju dva različita testa, od kojih se prvi odnosi za test porasta u kojem je vrijeme konstantnog protoka plina prije zatvaranja bušotine bilo 1000 sati. Ta krivulja označena je plavom bojom, dok se zelena krivulja odnosi na test porasta kada bi proizvodnja bila konstantna 40 000 sati prije zatvaranja. U tom slučaju se ipak uočava razvijanje kasnog pseudo-radijalnog protoka, u području koje je na dijagramu označeno kao kasni prijelazni period, gdje zelena krivulja slijedi nagib približno jednak nultom.

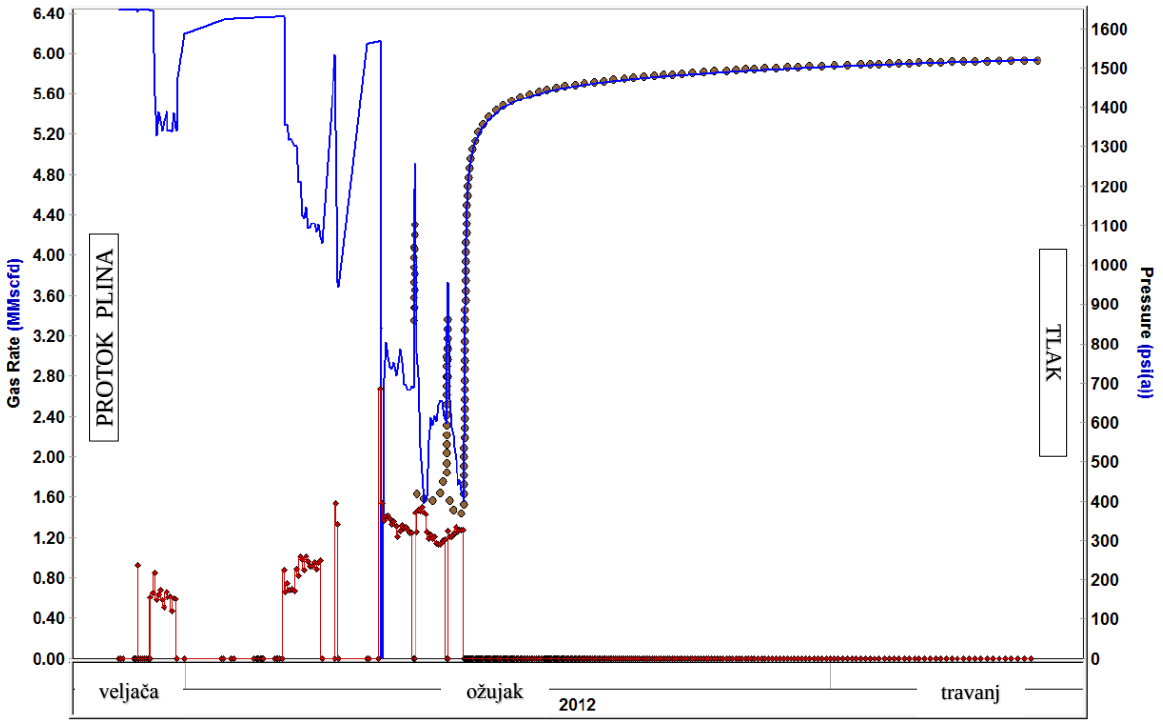


Slika 29: Simulacije derivacija krivulja testa porasta tlaka višestruko frakturirane horizontalne bušotine, za t_p = 1000 h i t_p = 40 000 h (Lougheed et al., 2013)

Na sljedećoj slici 30 su autori, temeljem spomenutih ulaznih podataka, interpretirali test porasta tlaka odabrane plinske bušotine na ležištu Eagle Ford. Ovdje prvenstveno treba opetovano naglasiti veliku prednost objavljivanja jednog ovako dugo mjerenog testa porasta u slabo propusnom ležištu, jer su na taj način i ostalim istraživačima ostavljena otvorena vrata za eventualni doprinos u pouzdanosti određivanja propusnosti. Isto tako, značajna prednost je i to što su autori na slici 31 objavili i cijeli *'history plot'* za test porasta, koji je također važan za daljnja istraživanja i razvoj nove metode u 4. poglavlju. Naime, i autori sami kroz naslov svog rada ostavljaju mogućnost nadogradnje ovakvih istraživanja, navodeći da se u odnosu na predviđene oblike protoka modelom, u ovom ispitivanom vremenskom periodu mogu izdvojiti i rani radijalni i bilinearni protok. No, nažalost s obzirom na heterogenost slabo propusnog ležišta, autori obrazlažu da iz očitanja ne mogu sa sigurnošću utvrditi koliki je točno iznos propusnosti stijene, jer se za svaki oblik protoka dobiva različit rezultat. Na dijagramu se može vidjeti (slika 30) da je kod radijalnog protoka izračunata propusnost stijene približno jednaka 6600 nD (6,5767E-03 mD = 6,6E-18 m^2), dok je kod bilinearnog protoka skoro 7 puta manja i iznosi 1000 nD (1,000E-03 mD).



Slika 30: Analiza testa porasta tlaka višestruko frakturirane horizontalne bušotine u slabo propusnom ležištu šejla, Eagle Ford (Lougheed et al., 2013)



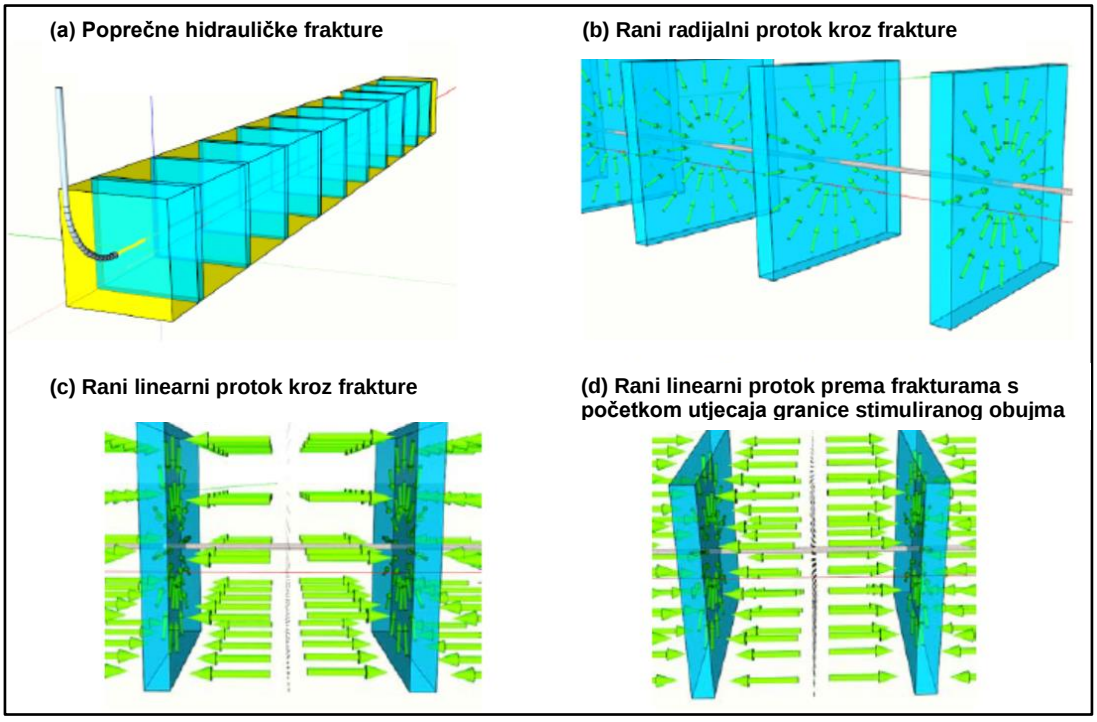
Slika 31: *'History plot'* za test porasta tlaka višestruko frakturirane horizontalne bušotine u slabo propusnom ležištu šejla, Eagle Ford (Lougheed et al., 2013)

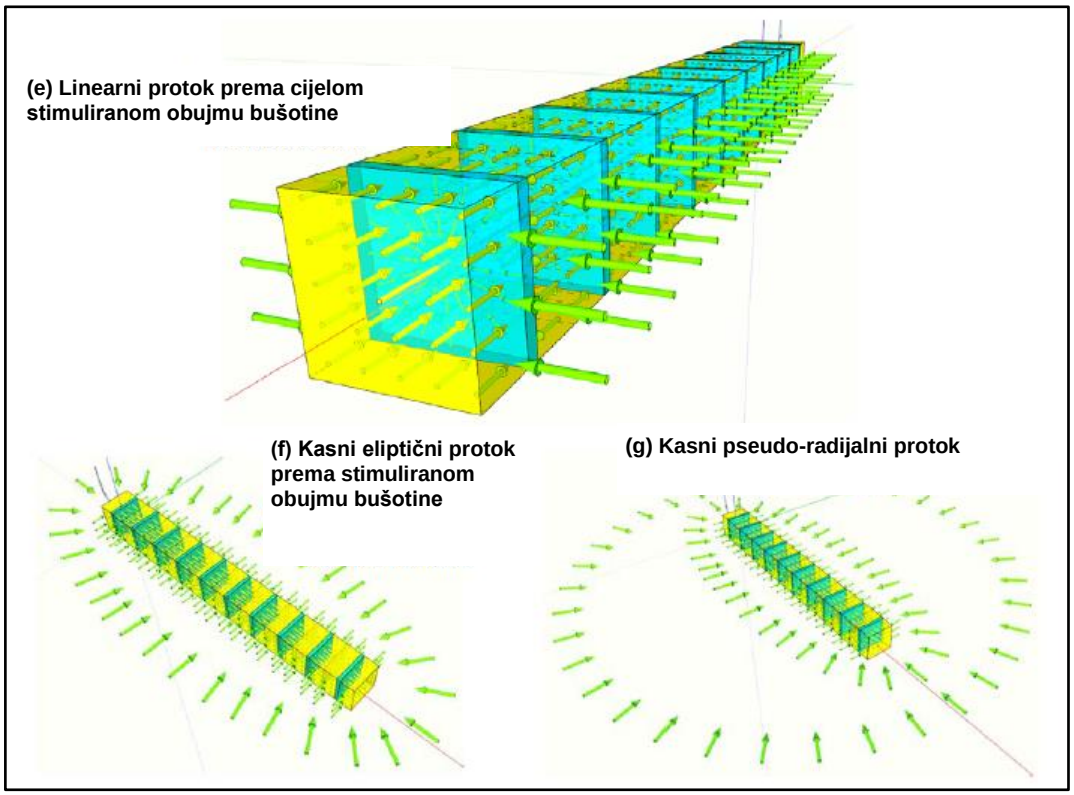
Glavni nedostatak ove metode je nepouzdanost dobivenih rezultata, jer se otkrivanjem podataka mjerenja i do 27. dana nakon zatvaranja bušotine uvidjelo točno stanje u ležištu, te je ustanovljeno da procjena propusnosti iste stijene prema dva različita oblika protoka nije jednaka. Nažalost, autori ovdje nisu objavili i jednadžbe za izračun propusnosti, tako da se dobiveni iznosi ne mogu provjeriti, ali je jasno uočljivo na slici 30 da povlačenje pravaca kroz točke preklapanja mjerenih i modeliranih podataka, čiji nagibi bi odgovarali ranom radijalnom (m = 0) i bilinearnom obliku protoka (m = 1/4), ne daju zadovoljavajuće rezultate. No, autori su se ipak priklonili vrijednosti od 6600 nD (6,6E-18 m^2), jer odgovara iznosu dobivenom laboratorijskim mjerenjem na jezgri. Autori također ne navode je li bušotina u kasnijoj fazi proizvodnje pokazala dobro poklapanje s proizvodnim modelima, u koje bi bila uvrštena odabrana vrijednost propusnosti stijene, pa bi i odavde slijedio odabir iznosa od 6600 nD (6,6E-18 m^2).

3.2. Metoda prema autoru Bahramiju i suradnicima

Bahrami i suradnici su u radu iz 2010. godine prvi puta objavili metodu za određivanje propusnosti slabo propusnih plinskih ležišta, koja se temelji na drugoj derivaciji krivulje testa porasta tlaka. Istu metodu Bahrami je obradio i u svom doktorskom radu iz 2012. godine, te ju je sa suradnicima primijenio u radu iz 2013. godine, kao i u još nekoliko radova (2012c; 2012b; 2012a). U metodi se najprije navode svi oblici protoka koji bi se mogli pojaviti kod višestruko frakturirane horizontalne bušotine s poprečnim frakturama (slika 32 (a)). Autori također naglašavaju poznatu činjenicu da analizom testova porasta tlaka u bušotinama slabo propusnih ležišta vrlo često nije moguće ustanoviti o kojem obliku protoka se radi. Nemogućnost primjene poznatih metoda slijedi iz problema prekratkog trajanja porasta tlaka uslijed kojeg ne dolazi do stabilizacije tlaka u prijelaznom periodu krivulje porasta na log-log dijagramu. Ukoliko je utvrđivanje oblika protoka nesigurno, niti dobiveni rezultati za propusnost stijene ne mogu biti točni. Stoga su autori pouzdanost određivanja propusnosti stijene probali povećati uvođenjem druge derivacije krivulje porasta tlaka.

Kod opisa pojedinih protoka autori također citiraju Bourdeta (1998), uz pretpostavku da svaki pojedini oblik vremenski slijedi jedan iza drugoga, ovisno o tipu bušotine i o geološkim svojstvima nekonvencionalnog ležišta (slike 32 (b) do (g)).





Slika 32: Oblici protoka višestruko frakturirane horizontalne bušotine (Bahrami et al., 2013)

Nakon toga se pozivaju na poznate nagibe krivulje derivacije tlaka u log-log dijagramu (slika 46a), koji analogno prethodnoj metodi, iznose od ½ za linearni oblik protoka do nultog nagiba za pseudo-radijalni protok, koji je prikazan na slici 32 pod (g). Metoda koju su razvili temelji se upravo na kasnom pseudo-radijalnom obliku, do kojeg tijekom trajanja testa porasta tlaka u slabo propusnom ležištu ne dolazi. Stoga su autori uvođenjem 2. derivacije tlaka pokušali razviti metodu kojom bi se vrijeme početka ovog perioda moglo predvidjeti.

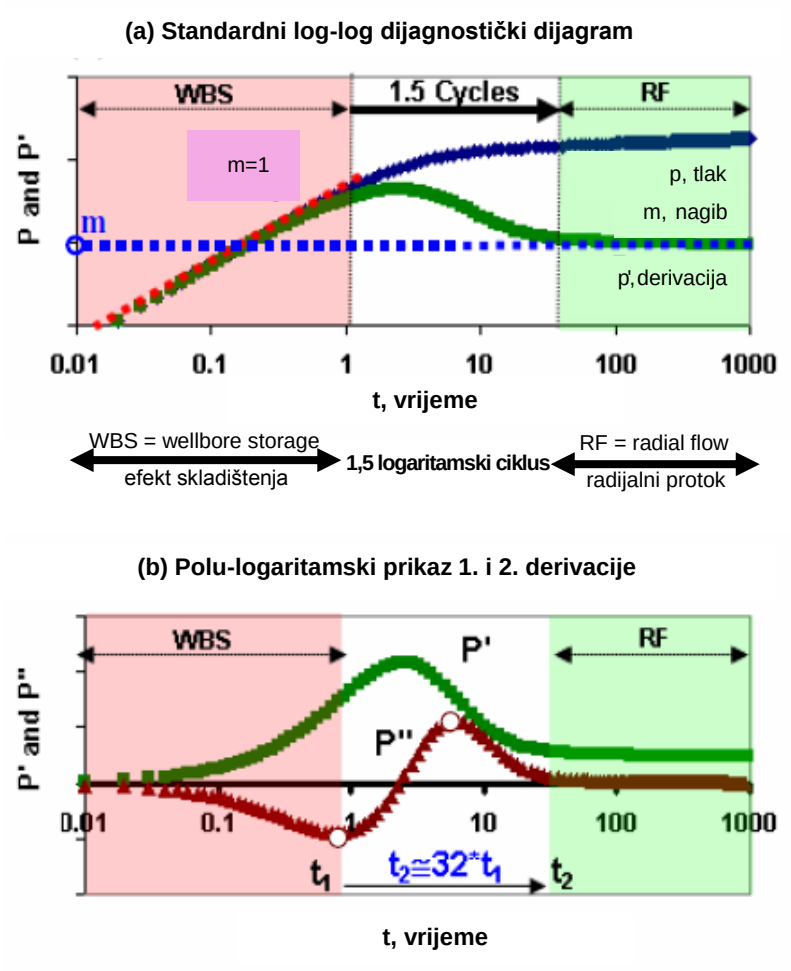
U izvodu jednadžbe za određivanje propusnosti u svim navedenim radovima, autori kreću od rješenja jednadžbe difuzije za naftu (DDA book, 2017; Bahrami et al., 2013; Murickan et al., 2012). Ali, primjenjuju je za izvod 2. derivacije tlaka u testu porasta na plinskom ležištu slabo propusnog pješčenjaka Perth Basin, u zapadnoj Australiji, prema jednadžbi:

$$\frac{d^2[\Delta p]}{d\left[-\ln\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}\right]^2}=0 \qquad (3.1)$$

Nažalost, niti u jednom radu nema dovoljno ulaznih podataka o testu porasta, kako bi se njihov rezultat za propusnost stijene mogao provjeriti, a koju također u slučaju testa za plinsko ležište računaju prema jednadžbi za naftu:

$$k = \frac{162,6 \times q \times \mu \times B}{2,3 \times m \times h} \tag{3.2}$$

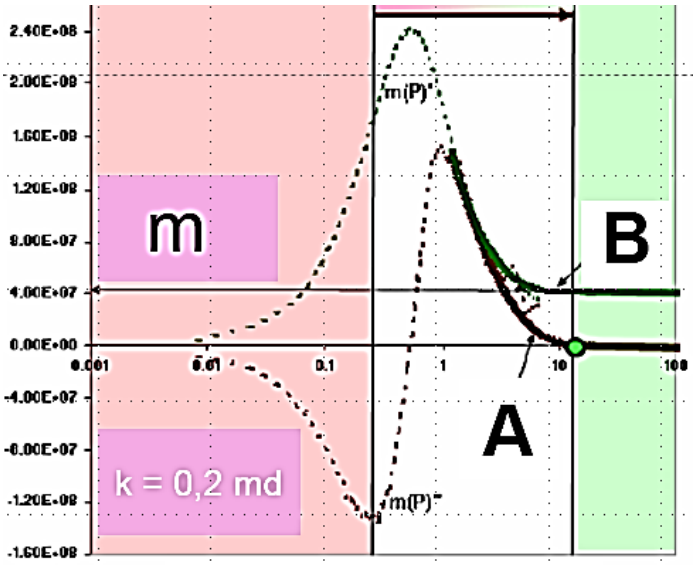
Isto tako nema ni ostalih objavljenih radova koji bi ovu metodu citirali ili je primijenili na nekim drugim testovima porasta, a doktorsku disertaciju je u cijelosti objavila izdavačka kuća Springer. Razvoj Bahramijeve metode kreće sa slikom 33(a), gdje je plavom krivuljom pod (a) ilustrirana krivulja porasta tlaka na standardnom log-log dijagramu za konvencionalno ležište, a zelenom bojom njegova prva derivacija, *p'*, koja pri kraju mjerenja ulazi u područje stabilizacije tlaka, nagiba 0. Crvenom linijom označeno je područje skladištenja, gdje nagib derivacije iznosi 1, a koje traje do nekog vremena t_1. Glavni doprinos ove metode je što su autori putem druge derivacije tlaka, *p''*, ekstrapolirali prvu derivaciju krivulje porasta, *p'*, do područja stabilizacije tlaka. Na slici 33 pod (b), je najprije dan primjer za konvencionalno ležište i potpunu krivulju porasta u polu-logaritamskom dijagramu, a na slici 34, je objašnjena metoda produljenja krivulje za 1. i 2. derivaciju tlaka, kada bi mjerenje bilo prekratko za postizanje kasnog radijalnog protoka. Ovaj oblik odgovara pseudo-radijalnom obliku za slučaj višestruko frakturirane bušotine ili za neki drugi tip stimulirane bušotine u slabo propusnom ležištu.



Slika 33: Razvoj 2. derivacije tlaka do radijalnog oblika protoka (Bahrami et al., 2013)

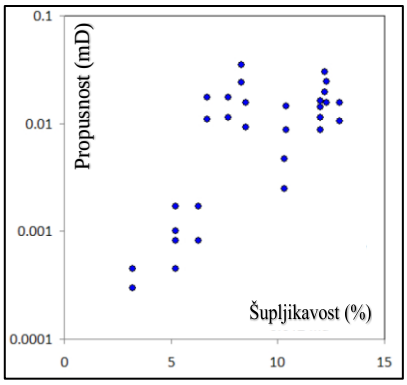
Kod vremenski potpune krivulje testa porasta, je zaključeno da 2. derivacija nakon prolaska kroz svoju drugu ekstremnu točku ulazi u područje stabilizacije tlaka, koje odgovara radijalnom protoku, i to u vremenu t_2 koje je točno 32 puta dulje u odnosu na trajanje skladištenja fluida (t_1). Stoga su na polu-logaritamskom dijagramu za slabo propusno ležište na slici 34 uveli dva ključna koraka ekstrapolacije 1. i 2. derivacije tlaka, gdje se pod A najprije tzv. metodom *'curve-fittinga'* produljuje 2. krivulju do pretpostavljenog vremena pojave radijalnog protoka tj. nakon njenog prolaska kroz drugu ekstremnu točku. Zatim se iz 2. derivacije računa iznos 1. derivacije u istom periodu područja za radijalni protok, odakle je za konkretnu bušotinu i ležište očitan nagib *m* od 4,1E+7 psi^2/cp (2,03E+18 $Pa^2/Pa{\cdot}s$). Skala se u ovom slučaju odnosi na funkciju pseudo-tlaka, *m(p)*, a iz očitanog nagiba bi se prema jednadžbi (3.2) trebalo izračunati propusnost stijene, za koju autori tvrde da u ovom ležištu iznosi k = 0,2 mD (0,2E-15 m^2). Kako za konkretnu bušotinu nisu naveli ostale neophodne, ulazne podatke o svojstvima ležišnog

fluida, ležišta i bušotine, ovaj iznos nije moguće provjeriti. Osim toga u ovom radu je iz nazivnika jednadžbe za određivanje propusnosti, bez objašnjenja, ispušten broj 2,3, tako da je vjerodostojnost rezultata upitna.



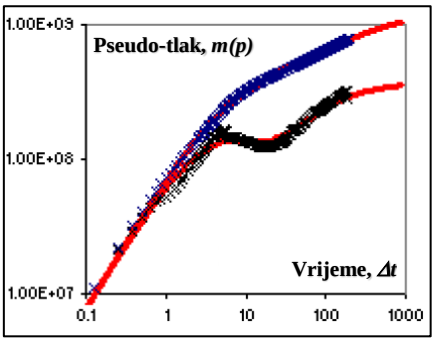
Slika 34: Ekstrapolacija 1. i 2. derivacije tlaka za test porasta u slabo propusnom ležištu pješčenjaka, Perth Basin (Bahrami et al., 2010)

No, u ostalim radovima autori ipak daju mogućnost provjere iznosa izračunate propusnosti. U radu iz 2010. samo tvrde da se rezultat dobro uklapa u proizvodne modele, što je opet nedorečeno bez konkretnih podataka o proizvodnim mogućnostima tih bušotina, a druga se provjera odnosi na iznos propusnosti stijene određene u radu iz 2013! Naime, ovdje je priložen i dijagram laboratorijskih mjerenja jezgre iz bušotine slabo propusnog pješčenjaka, na kojem je propusnost stijene u jedinici mD dana u odnosu na njenu šupljikavost, izraženu u postotcima (slika 35).



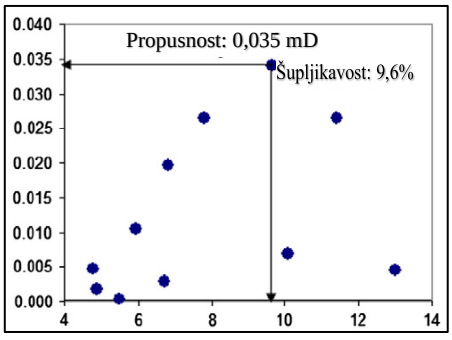
Slika 35: Propusnost jezgre u odnosu na njenu šupljikavost za slabo propusno ležište pješčenjaka, Perth Basin (Bahrami et al., 2012b)

Autori su ovdje analizirali test porasta tlaka u frakturiranoj bušotini slabo propusnog pješčenjaka, gdje očitanje nagiba *m* za radijalni protok iznosi 3,7E+7 psi^2/cp (1,83E+18 $Pa^2/Pa{\cdot}s$), a za propusnost tvrde da je k = 0,006 mD (6,0E-18 m^2). U radu se navodi da ova propusnost odgovara iznosu šupljikavosti sa slike 35, ali nigdje ne navode kolika je točno ta šupljikavost, a prema dijagramu bi trebala biti oko 10%. Isti test porasta analiziran je i u radu iz 2012b, a dan je na slici 36.



Slika 36: Test porasta tlaka frakturirane bušotine u slabo propusnom ležištu pješčenjaka, Perth Basin (Bahrami et al., 2012b)

Ovaj test odabran je kasnije za probu provjere nove metode (5. poglavlje), iako puno podataka nedostaje, za razliku od rada Lougheedove grupe, gdje su objavljeni svi neophodni podaci o testu porasta tlaka. Kako bi se eventualno došlo do što više korisnih informacija, svi spomenuti radovi Bahramijeve grupe su detaljno proučeni. Tako je primjerice u radu iz 2012a objavljen još jedan dijagram s laboratorijskim podacima o petrofizikalnim svojstvima jezgre s istog slabo propusnog pješčenjaka u Perth Basinu (slika 37). Iz tog dijagrama proizlazi da propusnosti u iznosu od 0,035 mD (0,035E-15 m^2) odgovara šupljikavost od 9,6%, a dana je također i nekolicina podataka o svojstvima ležišta i bušotine, koji se koriste za postavljanje simulacijskog modela frakturirane bušotine.



Slika 37: Propusnost jezgre u odnosu na njenu šupljikavost za slabo propusno ležište pješčenjaka, Perth Basin (Bahrami et al., 2012a)

Glavni nedostatak ove metode bi bio što nije matematički dovoljno potvrđeno iz kojeg razloga bi drugi ekstrem 2. derivacije tlaka bio primjenjiv za pouzdano predviđanje vremena početka pseudo-radijalnog protoka. Osim toga, odavde se ne može uzeti kao jedinstveno pravilo za sve testove porasta tlaka u svim bušotinama svih slabo propusnih ležišta, da bi vrijeme početka pseudo-radijalnog protoka bilo točno 32 puta dulje od trajanja efekta skladištenja. Ovu činjenicu autori i navode u svojim radovima. Očito je jedini razlog za mogućnost primjene ove metode bio poznavanje propusnosti jezgre u ispitivanim bušotinama, jer se na taj način može pretpostaviti koliki bi trebao biti nagib *m*, koji proizlazi iz 1. derivacije krivulje porasta tlaka. Odavde se zna i koliki bi trebao biti iznos 2. derivacije nakon njenog drugog ekstrema, pa se taj dio krivulje modelira do potrebnog vremena početka pseudo-radijalnog protoka, spomenutom metodom *'curve-fittinga'*. Kada bi postojao suprotan dokaz, tj. da drugi ekstrem 2. derivacije za svaku bušotinu u svakom slabo propusnom ležištu pada točno na početak pseudo-radijalnog protoka, ovu metodu bi se moglo proglasiti pouzdanom i jedinstvenom za primjenu. U tom slučaju bi se moglo pretpostaviti da bi u proteklih nekoliko godina od prvog objavljivanja ove metode bilo više objavljenih radova s potvrdom točnosti primjene 2. derivacije tlaka. Međutim, poznato je da za svaku bušotinu u kojoj se izvodi test porasta tlaka, odnosno u kojoj postoje proizvodni uvjeti zbog kojih je neophodno odrediti propusnost stijene, nema laboratorijskih analiza jezgri. Ove analize bi iziskivale dodatne financijske troškove za cijeli proizvodni ciklus bušotine i ležišta, pa stoga nije moguće niti provjeriti točnost metode za svaki pojedini slučaj.

S obzirom da se Bahrami N. u radu iz 2015. godine nastavlja baviti razvojem iste metode, upitna je i točnost daljnjih rješenja za određivanje propusnosti stijene, koja teoretski proširuje za sve tipove bušotina u svim slabo propusnim ležištima nafte i plina. Možda je upravo ova metoda, koja prvenstveno ima znanstveni doprinos, ali za sada ne i praktični, dovela do stagnacije istraživanja novih pristupa u području određivanja propusnosti slabo propusnih ležišta temeljem testova porasta tlaka. Stoga je jedan od ciljeva u razvoju nove metode u 4. poglavlju doći do konačnog zaključka je li moguće doći do novih rješenja za određivanje propusnosti stijene optimiranjem trajanja testa porasta tlaka.

3.3. Primjena programa Saphir i proizvodnog modela Houzea i suradnika

Program Saphir koristi se za analizu testova porasta tlaka u naftnim kompanijama širom svijeta, ali također nema konačna rješenja za određivanje propusnosti stijene i ostalih svojstava nekonvencionalnih ležišta nafte i plina, jer je primjena metode PTA u ovim ležištima i dalje u fazi istraživanja. Međutim, njegovi autori iz tvrtke Kappa (Houze i suradnici) su u 10. poglavlju knjige *'Dynamic Data Analysis'* (2017), objavili svoj doprinos na području razvoja proizvodnih modela za bušotine u nekonvencionalnim ležištima šejla. Pozivajući se na ključnu činjenicu, kako bi primjenjivost ovih modela mogla biti moguća i u testovima porasta tlaka samo u slučaju njihovog ekstremno dugog trajanja, autori razvijaju druge pristupe određivanja propusnosti stijene. To su analize krivulja smanjenja proizvodnje (engl. *decline curve analysis*), čiji rezultati se primjenjuju u metodi *'Rate Transient Analysis'* (RTA). Glavni nedostatak ove metode sličan je nemogućnosti primjene metode PTA u slabo propusnim ležištima, uslijed nedovoljnog broja proizvodnih podataka, jer je većina slabo propusnih ležišta i dalje u početnoj fazi proizvodnje s obzirom na prosječni vijek bušotina od 40 godina. Stoga za RTA metodu nema vremenski dovoljno dugog pregleda proizvodnih podataka na reprezentativno dovoljnom broju bušotina, kojim bi se točnost određivanja propusnosti stijene mogle potvrditi, kao kod primjene iste u analizama stoljetne proizvodnje konvencionalnih ležišta ugljikovodika. To znači da će metoda RTA ipak postati provjerljiva u doglednom vremenu, koje za sada nigdje u literaturi nije definirano. No, može se pretpostaviti da će trebati proći još minimalno 20 do 30 godina do konačne provjere njenih rezultata za određivanje propusnosti stijene u slabo propusnim ležištima. Za razliku od toga, kod razvoja PTA metode za analizu testova porasta tlaka u ovim ležištima, do sada nije postojala niti približna mogućnost usporedbe hoće li se 'kratkim' testovima ikada moći pouzdano odrediti propusnost stijene. Iako se čini da u posljednjih nekoliko godina, istraživanja više ne idu u ovom smjeru i to radi veće nesigurnosti uspješnosti metode PTA u odnosu na RTA metodu, veliki znanstveni izazov je pokušati naći novu metodu kojom bi se pouzdano analizirali i testovi porasta slabo propusnih ležišta, kao što je prikazano u 4. poglavlju.

Iako je primjena programa Saphir pouzdana samo u dobro propusnim ležištima, on je djelomično korišten i kod razvoja nove metode u slabo propusnim ležištima. Stoga je ovdje prikazana analiza testa porasta tlaka za bušotinu na ležištu šejla Eagle Ford, iz rada Lougheeda i suradnika, gdje program, logički, daje potpuno krivi izlazni podatak o propusnosti stijene. Za razliku od toga, u 4. poglavlju je ponovno prikazana analiza istog

testa porasta, ali uz uvedene modifikacije nove metode, a koje po prvi puta omogućuju i optimiranu primjenu Saphira s pouzdanijim rezultatom za propusnost stijene i u slabo propusnim ležištima.

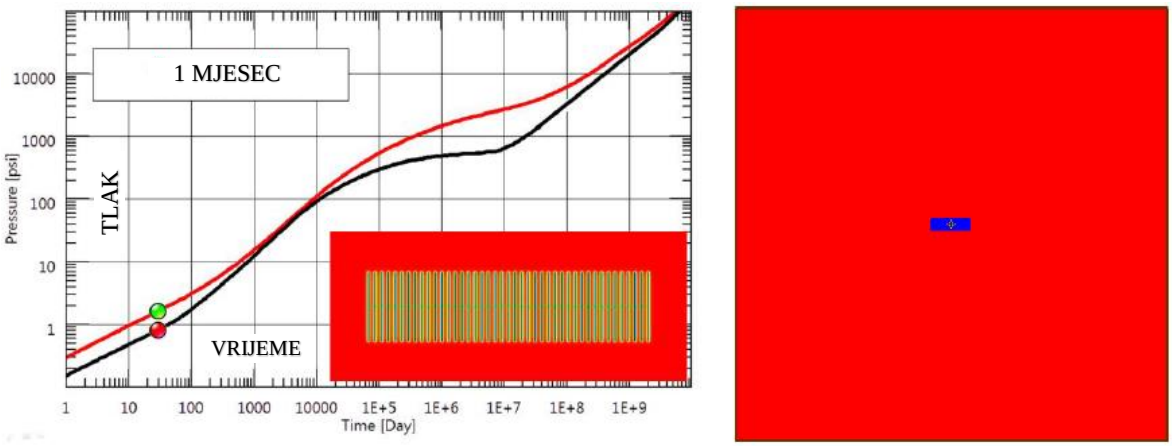
Međutim, najprije treba iznesti značajke u razvoju proizvodnih modela za bušotine u slabo propusnim ležištima, do kojih su došli autori iz Kappe, a koje se posebno odnose na analizu tlaka u ovakvom tipu bušotina. Isto tako, važno je napomenuti, da je ovaj proizvodni model proizašao iz puno opširnijih istraživanja objavljenih unutar projekta KURC (Kappa Unconventional Resources Consortium, 2016). U projektu sudjeluje više od 10 nacionalnih i međunarodnih naftnih kompanija, s ukupno 28 ostalih nezavisnih stručnjaka i konzultanata, a godišnji budžet za KURC je 3,5 milijuna Eura.

Autor Houze sa suradnicima kreće od poznate činjenice da se maksimalni protok iz slabo propusnog ležišta dobiva višestruko frakturiranim horizontalnim bušotinama, radi velikog povećanja kontaktne površine između ležišta i bušotine. Sukladno tome, i prethodne dvije metode su bazirane na istom tipu bušotine, pa je u tom smjeru išao i razvoj nove metode u 4. poglavlju. Nadalje, autori sužavaju područje istraživanja, koncentrirajući se samo na proizvodnju nafte i plina iz ležišta šejlova. Kao glavnu razliku između konvencionalnih i nekonvencionalnih ležišta navode iznos propusnosti stijene, koja se u istraživanjima slabo propusnih ležišta kreće u već spomenutom rasponu, od mikro do nano Darcyja (10^{-18} do 10^{-21} m^2). Ostale ključne razlike, koje ističu kao bitne kod postavljanja proizvodnih modela ovakvih sustava bušotine i ležišta, su:

- primjenjivost poznatih rješenja jednadžbe difuzije, s obzirom na prijelazni period proizvodnje tijekom cijelog vijeka bušotine;
- definiranje vremena pojavljivanja pojedinih oblika protoka, radi pojednostavljenja uslijed geometrijske složenosti proizvodnog sustava;
- nedovoljan trend poznatih podataka o proizvodnim mogućnostima bušotina kroz duži period proizvodnje, jer ih je većina tek u početnoj fazi rada.

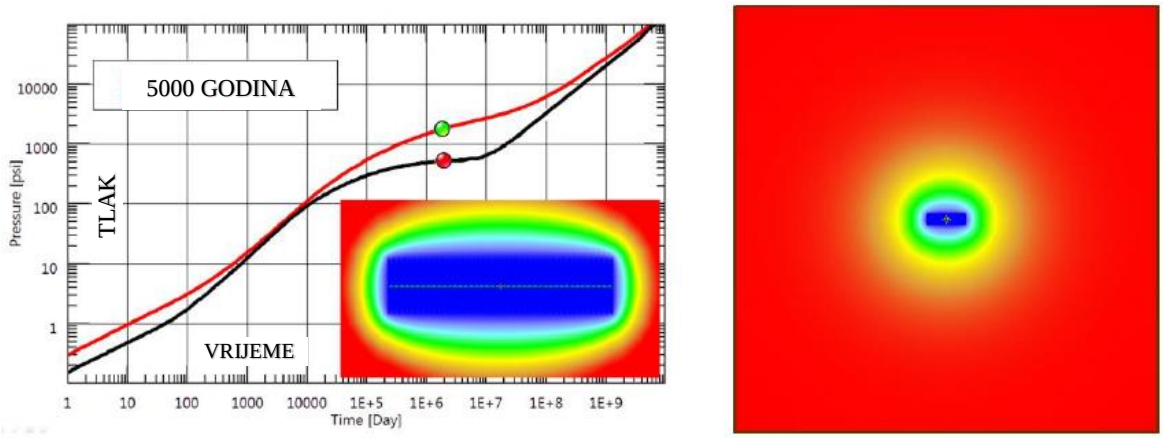
Osim toga, postoje i dodatna odstupanja modela, koja za sada nije moguće uvesti, kako bi što realnije opisivao promjene tlaka u ležištu. Ona će se u budućnosti postepeno uvoditi, analogno odstupanjima proizvodnih modela kod konvencionalnih ležišta, pojašnjenim i kroz jednadžbu 2.13, nakon što idealni model bude provjerljiv s dovoljno ulaznih podataka. Iz već opisanih razloga, za sada se u slabo propusnim ležištima još ne raspolaže s tim podacima, pa autori smatraju da se ovaj idealizirani model može uzeti kao najprihvatljivije rješenje za pretpostavku ponašanja tlaka u ležištu. Uz još dodatnih pojednostavljenja vezanih uz ležišne uvjete, Darcyjev protok i položaj bušotine u ležištu,

kao prve rezultate proizvodnog testa, autori izdvajaju nekoliko grafičkih prikaza. Polaze s predviđanjem pojave ranog linearnog oblika protoka, nakon mjesec dana proizvodnje. Uz log-log dijagram tlaka i njegove derivacije na slici 38, ilustriran je i modeliran oblik protoka prema bušotini.



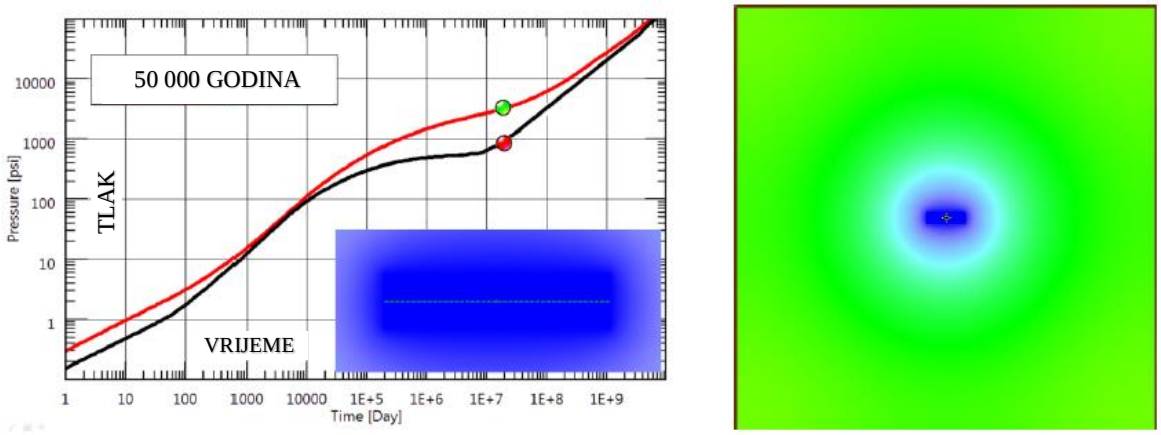
Slika 38: Rani linearni protok u višestruko frakturiranoj horizontalnoj bušotini, prema autoru Houzeu i suradnicima (DDA book, 2017)

Nakon 3. mjeseca proizvodnje, modelom se predviđa prijelazni period prema linearnom protoku ka cijeloj bušotini, a nakon pet godina to više nije prijelazni nego potpuni linearni protok prema bušotini. Zatim iznose pretpostavke modela nakon 50 i 500 godina, za oblike protoka koji bi se razvili nakon što je završio cijeli linearni protok prema bušotini. Naglašavaju da bi do pseudo-radijalnog protoka, koji odgovara neograničeno djelujućem radijusu bušotine, došlo tek oko 5000 godina nakon početka rada bušotine (slika 39).



Slika 39: Pseudo-radijalni protok u višestruko frakturiranoj horizontalnoj bušotini, prema autoru Houzeu i suradnicima (DDA book, 2017)

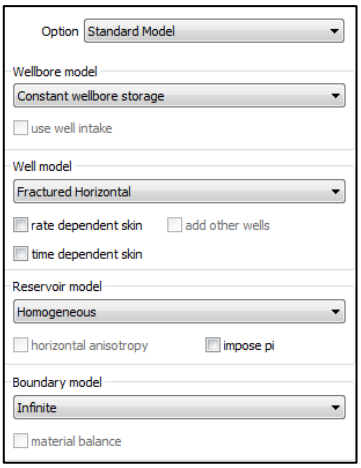
Kao posljednji oblik protoka, modelom se predviđa kraj prijelaznog perioda i početak polu-stacionarnog stanja protjecanja u periodu od 50 000 godina, kada bi se počele osjećati granice ležišta (slika 40).



Slika 40: Polu-stacionarni protok u višestruko frakturiranoj horizontalnoj bušotini, prema autoru Houzeu i suradnicima (DDA book, 2017)

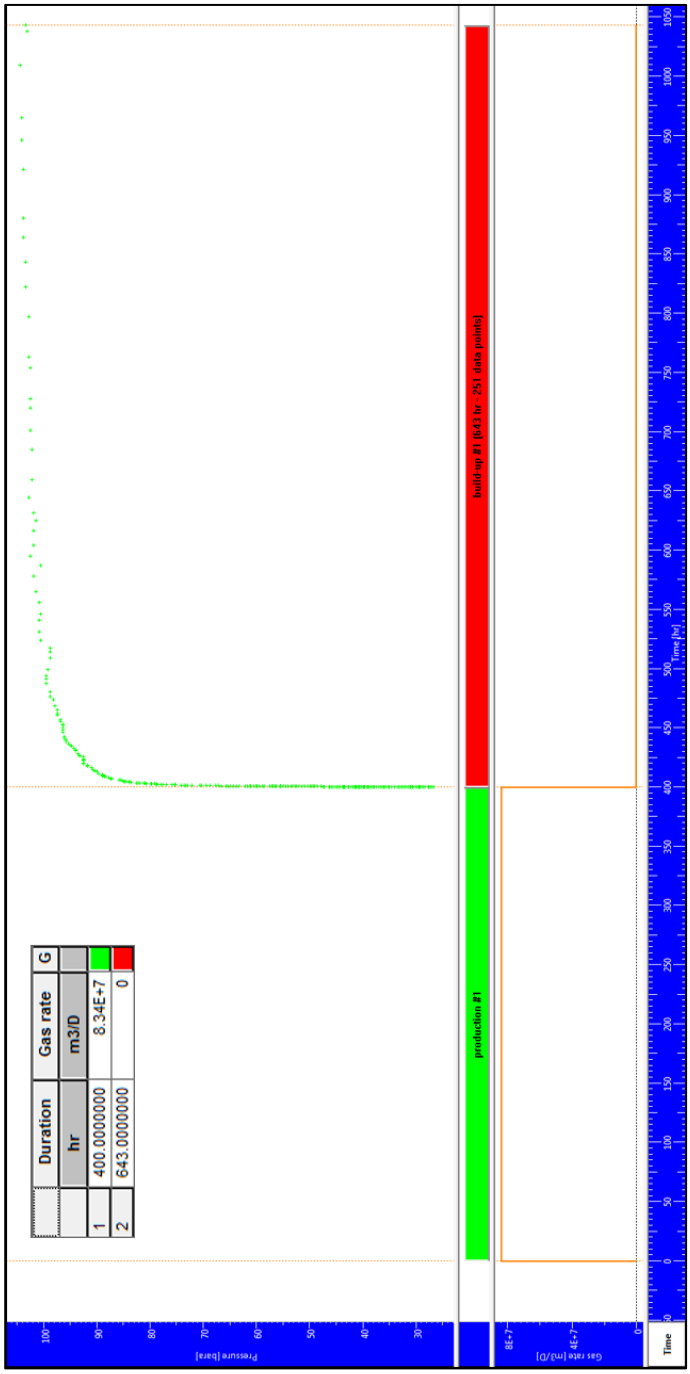
Autori, naravno, ističu da se ovdje radi samo o teoretskim predviđanjima, kojima je cilj sveobuhvatni uvid u moguće ponašanje tlaka do kraja prijelaznog perioda. Isto tako napominju da bi prilagodba ovakvog proizvodnog modela na analizu krivulje porasta tlaka također bila nerealna i neizvediva, te je općenita preporuka pronalaženje rješenja za određivanje propusnosti stijene samo za rani linearni oblik protok. Međutim, u razvoju nove metode u 4. poglavlju, je ponašanje porasta tlaka u ležištu analizirano sasvim neovisnim pristupom od ovdje iznesenog, ali je rješenje za vrijeme pojave pseudo-radijalnog protoka vrlo usporedivo. Stoga se primjenom nove metode može negirati njihova činjenicu da test porasta tlaka nije moguće analizirati metodom PTA, što je detaljno obrazloženo u diskusiji rezultata doktorskog rada.

Kako bi se do novih rješenja uopće moglo doći, treba krenuti od trenutnih mogućnosti u analizi testova porasta tlaka programom Saphir, pa ovdje slijedi najavljen primjer za višestruko frakturiranu horizontalnu bušotinu u ležištu šejla Eagle Ford. Svi ulazni podaci za program nalaze se u tablici 2 i prilogu 1, a za prvu procjenu propusnosti skraćenim modeliranjem se pretpostavlja konstantan iznos za konstantnu skladištenja i odabire se frakturirana horizontalan bušotina u homogenom, neograničenom ležištu (slika 41).



Slika 41: Ulazni podaci o bušotini i ležištu za program Saphir, ležište Eagle Ford

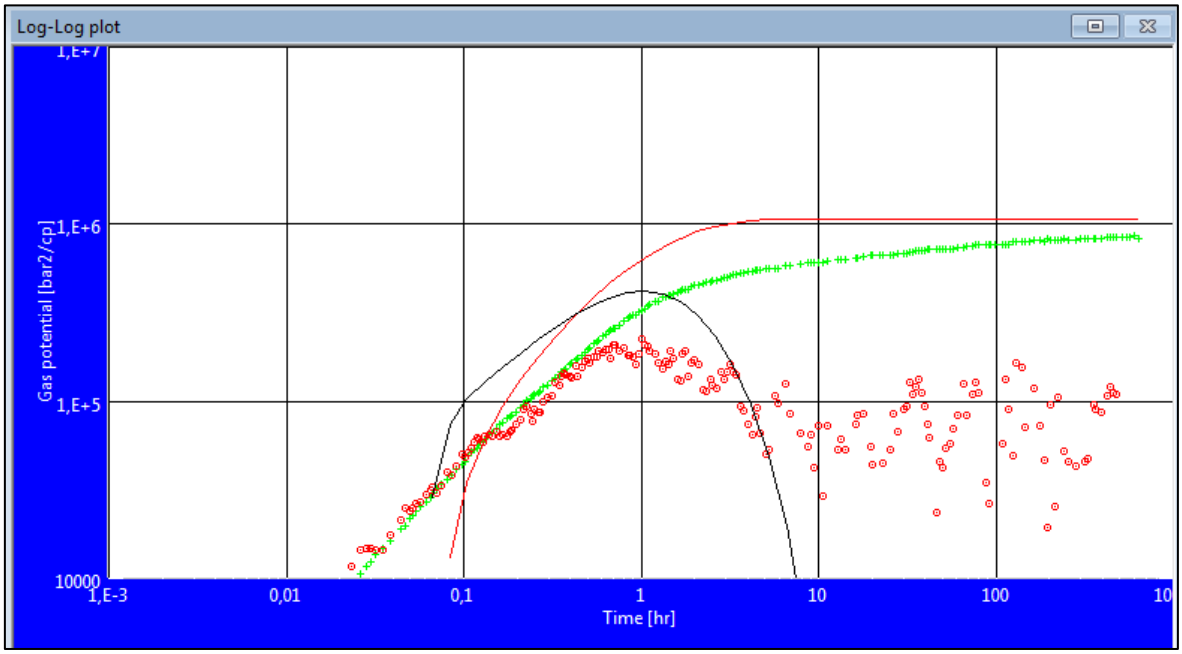
Na slici 42, dan je gotovo najvažniji dio testa porasta pod nazivom engl. *'History plot'*, u kojem se bilježi vrijeme, t_p, konstantne proizvodnje plina, q, prije zatvaranja bušotine i vrijeme trajanja testa porasta, Δt, uz izmjereni porast tlaka u bušotini, p. Analiza ostalih parametara iz ovog testa izložena je u sljedećem poglavlju kod razvoja nove metode. Prema ulaznim podacima sa slika 41 i 42, program postavlja krivulju porasta tlaka i njenu derivaciju kao što je prikazano na slici 43, za trajanje testa porasta od 27 dana tj. 643 sata. Na osnovu tih podataka, slično objašnjenom postupku mečiranja tipskih krivulja i derivacije tlaka u 2. poglavlju (slika 11), program računa nekoliko izlaznih podataka, od kojih je ovdje ključan iznos propusnosti, k (slika 44).



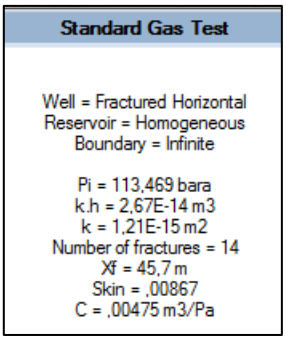
Slika 42: *'History plot'* za test porasta tlaka u programu Saphir, ležište Eagle Ford

U ovom testu je važno za uvidjeti da ne dolazi do oblika protoka koji bi odgovarao tzv. neograničeno djelujućem radijusu, što je neophodan uvjet za pouzdanost dobivenih rješenja, jer derivacija tlaka nije ušla u područje stabilizacije, gdje bi joj nagib bio 0. Iako su prilikom modeliranja unesene vrijednosti o poznatom početnom ležišnom tlaku i svim ostalim parametrima koji su uz izračun propusnosti prikazani na slici 44, odgovarajuće

'mečiranje' crvene linije modela i mjerenih podataka označenih zelenom bojom, kao i crne linije modela s derivacijom tlaka, označene crvenom bojom, nije moguće postići (slika 43).



Slika 43: Log-log dijagram analize testa porasta tlaka programom Saphir, ležište Eagle Ford



Slika 44: Rezultati analize testa porasta tlaka programom Saphir, ležište Eagle Ford

Iz tog razloga, izračunata propusnost stijene ne može odgovarati stvarnoj, nego je veća od očekivane (6600 nD = 6,6E-18 m^2) za red veličine od čak 1000 puta i iznosi k = 1,2E-15 m^2 (slika 44). Razvojem nove metode u sljedećem poglavlju, probalo se doći do pouzdanih rješenja propusnosti stijene i prilagodbe programa i za ova ležišta, optimiranjem trajanja testa porasta do pojave pseudo-radijalnog protoka.

4. Razvoj nove metode za analizu kratkih testova porasta tlaka u slabo propusnim plinskim ležištima

Početna ideja za razvoj ove metode bila je riješiti problem kod analize testova porasta tlaka u bušotinama slabo propusnih plinskih ležišta, gdje bi mjerenje tlaka za pouzdano određivanje propusnosti stijene trebalo trajati i puno dulje od mjesec dana. Kao što je već opisano, razlog potrebe za dugim trajanjem testa porasta je postizanje stabilizacije tlaka u ležištu, nakon zatvaranja bušotine za ispitivanje. Stabilizacija je neophodna radi prilagodbe poznatih metoda, razvijenih za određivanje propusnosti stijene s pomoću testova porasta tlaka u konvencionalnim ležištima ugljikovodika. Ove metode su izvedene na osnovu rješenja jednadžbi difuzije za neustaljeno stanje protjecanja fluida, ovisno o tome radi li se o hidraulički frakturiranim ili višestruko frakturiranim horizontalnim bušotinama. U svim tipovima bušotina izrađenim u slabo propusnim ležištima, ključni problem je trajanje testa porasta tlaka, koje se u skladu s konvencionalnim načinom ispitivanja, obično ne izvodi dulje od tri do četiri dana. Određivanje propusnosti stijene u dobro propusnim ležištima analizom ovako kratkih testova nije upitno, jer za sve slučajeve protoka fluida postoje rješenja koja daju pouzdane rezultate propusnosti. Glavni razlog radi kojeg se testovi u slabo propusnim ležištima ne provode niti dulje od nekoliko dana je veće ulaganje prouzročeno njihovim dugim trajanjem, za vrijeme kojeg je proizvodnja bušotine zaustavljena. Dugo trajanje testa bi prvenstveno bilo vrlo nepraktično, ali bi i uvelike smanjilo ekonomsku isplativost cijelog proizvodnog ciklusa bušotina u nekonvencionalnim ležištima nafte i plina. Time bi konačna cijena ovih energenata postala još veća, odnosno još manje konkurentna na tržištu, s obzirom da je poznato koliko ostalih ekonomskih parametara opterećuje isplativost ovih ležišta, od faze otkrivanja do krajnje točke proizvodnih sustava bušotina. Osim toga, postoji i opće prihvaćena činjenica da u slabo propusnim ležištima niti za duge testove, od čak mjesec dana trajanja nije razvijena pouzdana metodologija za njihovu interpretaciju.

Stoga se počela razvijati ideja kako optimirati trajanje testova porasta tlaka u bušotinama slabo propusnih plinskih ležišta. To konkretno znači da je nova metoda razvijana s ciljem da se i u nekonvencionalnim ležištima temeljem samo trodnevnog ili četverodnevnog ispitivanja može jednako pouzdano odrediti propusnost stijene, kao i u konvencionalnim ležištima. Slični pokušaji nekih autora izneseni su prethodno. Odjek u literaturi o potvrdi njihovih pristupa na različitim bušotinama, odnosno ležištima, za sada nije dostupan, što ne umanjuje doprinos u pionirskom razvoju ovakvih istraživanja.

Prije samog razvoja nove ideje, od posebne važnosti je bilo stečeno iskustvo i preneseno znanje iz područja tzv. toplinskih (T, s) log-log dijagrama (Budin i Mihelić, 2002). Oni se primjenjuju u termodinamici za rješavanje mnogih inženjerskih problema u širokom području energetike, a izrađeni su za različite fluide. To iskustvo iskorišteno je u razvoju nove metode, jer su upravo slični log-log dijagrami osnovni alat i u analizi testova porasta tlaka (slika 12). Detaljno istraživanje (T, s)-dijagrama, od konstrukcije tj. od njihovog nastanka do brojnih i neizostavnih primjena u praksi, koristilo je ovdje kao velika prednost. Analogija toplinskih dijagrama s testovima porasta tlaka ukratko je obrazložena u nastavku.

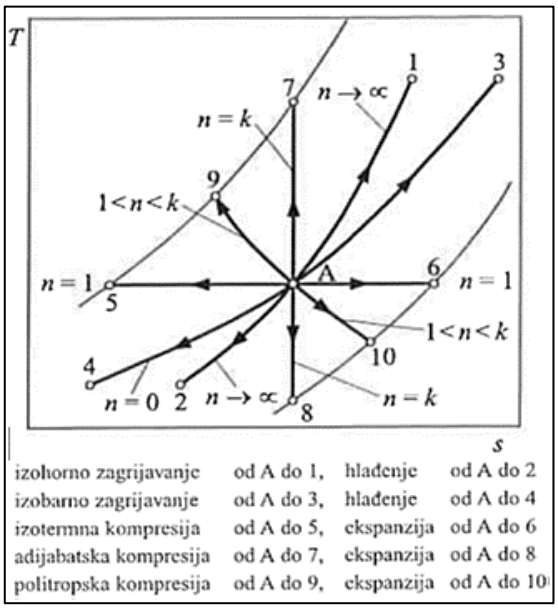
(T, s)-dijagram bez poveznica, kao što su jednadžba stanja, politropski koeficijenti (slika 45) ili glavni zakoni termodinamike, nije upotrebljiv. No, kada ga se koristi zajedno s nekim od ovih poveznica, daje nove mogućnosti za rješenje inženjerskih problema, pa tako primjerice i za određivanje snage bilo koje termoelektrane. Toplinska postrojenja u koja se ubrajaju i termoelektrane, nisu izravno u znanstvenom području grane naftnog inženjerstva, no bez fosilnih goriva, među kojima je i prirodni plin kao energent budućnosti, one nemaju svrhovitost. U uvodu je također dan pregled rezervi plina, te je naglašen potencijal nekonvencionalnih ležišta za buduće generacije, što isto tako nije u izravnoj vezi s ovim istraživanjem. Međutim, i to je bio dodatan motiv u razvoju ideje za analizu testova porasta tlaka u ovim ležištima, kojom bi se posredno utjecalo i na njihovo isplativije, a time i povećano iskorištavanje u budućnosti.

Politropske linije u (T, s)-dijagramu karakterizirane su određenim nagibima, koji su definirani kao politropski koeficijenti (slika 45). To je ujedno i glavna sličnost koja je pobudila ideju razvoja nove metode za analizu log-log dijagrama testova porasta tlaka, u kojima pak pravci različitih nagiba karakteriziraju pojedine oblike protoka u bušotini (slika 46a). Identifikacijom nekog od oblika protjecanja na slici 46b primjenjuju se odgovarajuća rješenja za određivanje propusnosti stijene, što je opisano prethodno.

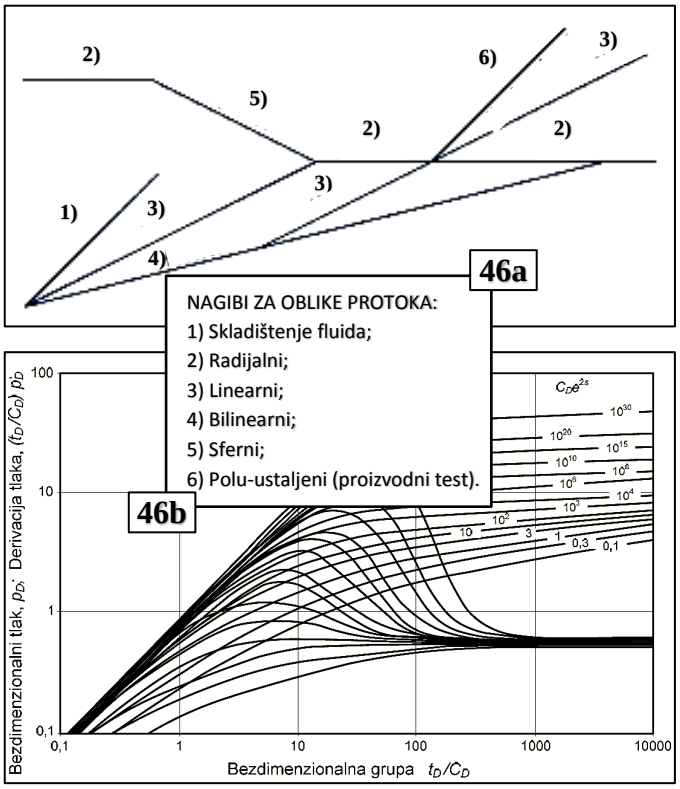
Promjena stanja se na nekom dijagramu općenito može prikazati krivuljom koja povezuje dvije točke, a u ovim slučajevima to su pravci određenih nagiba. Svaka točka na (T, s)-dijagramu karakterizirana je čak s pet različitih termodinamičkih veličina. Prve tri su ključne PVT varijable stanja koje povezuje jednadžba stanja, a uz njih su dane i skale za entalpiju, h, i entropiju, s, koje se mogu definirati termodinamičkim zakonima (slika 45).

Za razliku od toga, kod log-log dijagrama testa porasta tlaka postoje samo dvije skale, odnosno dva parametra (slika 12). Na apscisi je proteklo vrijeme mjerenja tlaka nakon zatvaranja bušotine, Δt, ili varijacije vremena definirane različitim metodama. Na ordinati je mjereni tlak, p, ili također različito izvedeni izrazi za tlak, prilagođeni za interpretiranje

pojedinih oblika protoka, ovisno o tome radi li se o plinskoj ili naftnoj bušotini. Ova dva parametra su povezana jednadžbom difuzije za protok fluida iz ležišta u različite tipove bušotina.



Slika 45: Politropski eksponenti i promjene stanja u (*T*, *s*)-dijagramu (Budin i Mihelić, 2002)



Slike 46a i 46b: Nagibi pravaca za oblike protoka i Bourdet log-log dijagram (Economides i Nolte, 2000; Bourdet, 1989)

S obzirom na usporedbu nerazmjernog odnosa poznatih ulaznih parametara na uspoređivanim log-log dijagramima, koji iznosi 5:2, i nova ideja se nastavila razvijati u tom smislu. Poznato je da samim testom porasta tlaka nije moguće povećati broj mjerenih tj. ulaznih varijabli, jer je već sam protok fluida, *q*, kao moguća treća varijabla jednak nuli. Isto tako, vrlo teško bi bilo postaviti nove, usporedne zakonitosti, kojima bi se povezalo sve parametre ležišta i bušotine, kao što to omogućuje jednadžba difuzije za protoke u različitim tipovima bušotina. Odavde slijedi da je za postizanje cilja, a to je pouzdano određivanje propusnosti stijene kratkim testom porasta u slabo propusnom ležištu, jedino rješenje naći novu metodu kojom bi se omogućila njihova interpretacija.

Upravo je ograničen broj poznatih varijabli testa porasta sve do sada bio glavna prepreka za postizanje nove, jedinstvene metode u potpuno nepoznatom području krivulje porasta, koji se na dijagramu očituje kao stabilizacija tlaka u slabo propusnom ležištu. Stoga je većina autora posegnula za novim definiranjem dviju varijabli, tlaka i vremena. Time log-log dijagram testa porasta u odnosu na (*T, s*)-dijagram, nažalost, i dalje ostaje na samo dvije koordinate, pomoću kojih pojedini autori svoje metode za interpretaciju područja stabilizacije tlaka, uglavnom temelje na simulacijama pojedinog ležišta. Glavni nedostatak ovakvih pristupa je u činjenici što se iste simulacije rijetko mogu primijeniti na različitim bušotinama. Svako je ležište slučaj za sebe, pa takve metode nisu ponudile jedinstveno pravilo, koje bi se jednostavno primjenjivalo u svim testovima porasta tlaka za svako slabo propusno ležište, što je jedan od ciljeva doktorskog rada.

Razvoj nove ideje išao je u smjeru postizanja jedinstvene metode, koja će se jednostavno provoditi u praksi na svim kratko ispitivanim bušotinama slabo propusnih ležišta, gdje mjerenje ne bi bilo dulje od četiri dana. Stoga je zaključeno, da će se adekvatno rješenje potražiti u suprotnom smjeru od onoga u kojem su išla dosadašnja istraživanja. U njima je na log-log dijagramima najvažniji bio tzv. 'vanjski dio' tj. nove definicije istih parametara koordinata. U novoj metodi se na drugačiji način ušlo u 'srž' dijagrama, pri čemu su i apscisa i ordinata također suprotno dosadašnjim pokušajima, ostavljene u izvornom tzv. sirovom obliku, ali se samu krivulju porasta interpretira na novi način.

Analogija (*T, s*)-dijagrama s unapređenjem log-log dijagrama testa porasta u području stabilizacije tlaka odnosi se na postavljanje novih pravaca, koji povezuju ključne točke na krivulji porasta tlaka, iz čijih se pak nagiba novom metodom može doći do novih rješenja! Jedna od pretpostavki u razvoju ideje je bila da ukoliko na toplinskim dijagramima postoji nekoliko mogućnosti za izračun iste, vrlo složene nepoznanice, kao što je primjerice toplina kotla termoelektrane, onda se i na dijagramima testova porasta može otkriti neka

nova poveznica, koja bi pripomogla u rješenju problema određivanja područja stabilizacije tlaka u slabo propusnim ležištima, gdje ne postoje podaci mjerenja, jer bi trajala predugo i bila bi ekonomski neisplativa.

4.1. Odabir testa porasta tlaka za razvoj nove metode u VFHB

Na samom početku istraživanja odabrana su nekonvencionalna ležišta plina, jer osim što se plin smatra energentom budućnosti, rad bi dodatnom analizom testova porasta i u nekonvencionalnim ležištima nafte bio preopširan. No, rješenja do kojih se došlo u interpretaciji log-log dijagrama za područje stabilizacije tlaka u plinskim bušotinama slabo propusnih ležišta, mogu se prilagoditi i za primjenu u testovima slabo propusnih naftnih ležišta. Ono što se ovim radom isto tako nije moglo obuhvatiti, je odstupanje metode za slučaj dvofaznog protoka fluida iz ležišta u bušotinu, jer bi se time također prešli okviri teme doktorskog rada. Ovaj tzv. nedostatak je u skladu i s razvojnom fazom postojećih proizvodnih modela, u kojima su se, kao što je već opisano, tek naknadno definirali i dodavali izrazi za odstupanja od idealnih modela (Kurevija et al., 2018), kao što su primjerice dvofazni protok (Koščak Kolin et al., 2018), ne-Darcyjev protok (Zeng i Zhao, 2009; Gill et al., 2003) i slično.

Kao bazični test za postavljanje nove metode, od svih dostupnih testova porasta tlaka u slabo propusnim plinskim ležištima, odabran je gotovo jedini moguć s obzirom na cjelovitost podataka ispitivanja u trajanju od mjesec dana, a izveden je nakon višestrukog hidrauličkog frakturiranja horizontalne bušotine (eng. *post-frac*). Postoje i ostale prednosti odabira ovog testa. To je prvenstveno poznavanje svih relevantnih ulaznih podataka, neophodnih i za analizu u programu Saphir, softverskog paketa Ecrin, kojeg je licencirala tvrtka Kappa, a za koji RGNf posjeduje edukativnu licencu (#9643). Nadalje, prednost je što su na istom testu ostali autori već proveli analizu testa porasta, ali ne baš sasvim u području stabilizacije tlaka, i to prema vlastitom simulacijskom modelu. Autori tvrde da model nije bilo moguće sasvim pouzdano primijeniti, jer se pokazalo da niti tako dugo mjerenje nije trajao do stabilizacije tlaka u ležištu. Ovim testom je, osim odabira jednofaznog protoka i to u plinskoj bušotini, istraživanje usmjereno na pronalazak rješenja i na testove porasta tlaka nakon stimulacije bušotine (*post-frac*), iako postoje teze da se propusnost ovakvih ležišta može odrediti isključivo na testovima prije frakturiranja (eng. *pre-frac*). U istraživanju je bilo dostupno nekoliko bušotina i s *'pre-frac'* i s *'post-frac'* testovima, koji radi kratkog trajanja ili premalog broja nužnih podataka, nisu mogli poslužiti za izvod nove metode.

Međutim, nova metodologija omogućuje određivanje propusnosti upravo na *'post-frac'* testovima, kada se umjesto rješenja za radijalni protok analogno primjenjuju rješenja za pseudo-radijalni oblik protoka u različitim tipovima bušotina.

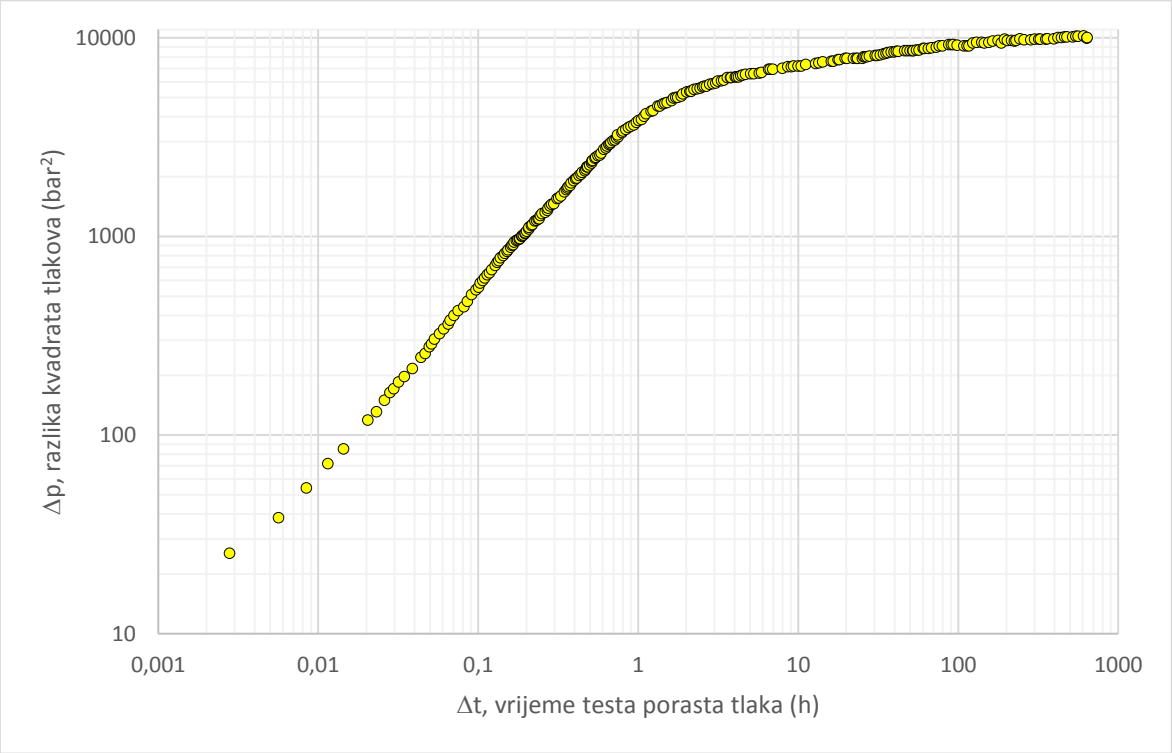
Na početku je izneseno da će se istraživanja provoditi na slabo propusnim plinskim ležištima pješčenjaka i šejlova, pa je odabrani test izmjeren na VFHB ležišta šejla, Eagle Ford u Texasu. Ostala svojstva ležišta, bušotine i testa porasta, neophodna za izvod nove metode dana su u tablici 2.

Tablica 2: Osnovna svojstva ležišta Eagle Ford, bušotine i 1. testa porasta tlaka

Naziv ležišta i broj testa porasta:	**Eagle Ford, 1. test**	
Svojstva ležišta i VFHB		Jedinice
Radijus bušotine, r_w	0,1	m
Duljina horizontalnog kanala, L	1370,1	m
Efektivna debljina ležišta, h	22	m
Početni ležišni tlak, p_i	113,8	bar
Ležišna temperatura, T_R	52,7	^oC
Šupljikavost ležišne stijene, ϕ	0,1	dio cijelog
Ukupna stlačivost, c_t	6,48E-8	Pa^{-1}
Dinamička viskoznost plina, μ	1,5E-5	Pa·s
Z faktor plina, -	0,814	-
Poluduljina frakture, x_f	45,7	m
Broj poprečnih fraktura, N	14	-
Radijus frakture, r_f	11	m
Vrijeme testa porasta tlaka, Δt	643	h
Vrijeme konstantnog protoka, t_p	400	h
Konstantan protok plina	83,4E+6	m^3/dan

Analiza ovog testa porasta tlaka objavljena je u cijelosti u radu Lougheeda i ostalih (2013) iz svjetski ugledne tvrtke Fekete Associates Ins (danas dio tvrtke IHS Energy), koja je uz Kappu jedna od vodećih u naftnom inženjerstvu u području inovacija i softverskih paketa za primjenu u analizi ispitivanja bušotina. U samom naslovu radu autori poručuju da prepoznavanje radijalnog tj. pseudo-radijalnog oblika protoka u testu porasta višestruko frakturirane horizontalne bušotine nekonvencionalnog ležišta i dalje u fazi istraživanja. S

obzirom da su detalji njihovog doprinosa već opisani, u svrhu nastavka razrade nove metode, ovdje se najprije preračunate jedinice koordinata log-log dijagrama istog testa porasta tlaka (slika 47). U uvodnom dijelu ovog poglavlja je najavljeno da će se u novoj metodi, suprotno dosadašnjim metodama u istraživanim dijagramima, na koordinatama ostaviti tzv. sirove podatke tlaka u bar^2, ovisnog o vremenu izraženom u satima. Kako bi se to postiglo, vrijednosti ordinate dijagrama na slici 30 iz originalnog Lougheedovog rada su preračunate iz jedinice za razliku pseudo-tlakova, $\Delta m(p)/q$, iskazane u $((10^6 psi^2/cp)/MMscfd)$, u jedinicu razlike kvadrata mjerenih tlakova, Δp. To znači da je u ovoj metodi za daljnju analizu kao ordinata odabran parametar razlike između kvadrata mjerenog tlaka, p^2_{ws}, i kvadrata nultog tj. početnog tlaka testa porasta, p^2_{wf}. Iz ovako postavljenog početnog dijagrama jasno je da se ovu metodu može prilagoditi i testovima porasta u slabo propusnim naftnim ležištima. U tom slučaju bi na ordinati također bio parametar, Δp, ali kao što je uobičajeno u praksi ispitivanja naftnih bušotina, to ne bi bila razlika kvadrata, nego samo razlika istih tlakova, pa bi stoga i jedinica na ordinati bila bar.



Slika 47: Odabrani test porasta tlaka za razvoj metode, ležište Eagle Ford

U prilogu 1 je dana tablica sa svim podacima izvedenog testa porasta tlaka na bušotini ležišta Eagle Ford, koja sadrži i nekoliko dodatnih stupaca opisanih uz tablicu 3.

Prije nadogradnje novih koraka metode, obrazloženo je iz kojih razloga je važan odabir upravo ovog oblika parametra tlaka na ordinati log-log dijagrama u analizi testa porasta tlaka plinskih bušotina.

4.2. Odabir oblika parametra tlaka na log-log dijagramu testa porasta

Za analizu testa porasta tlaka u slabo propusnim ležištima nije uzeta razlika funkcije pseudo-tlakova, $\Delta m(p)$, kao što je to uobičajeno u većini metoda za plinska ležišta, nego razlika kvadrata tlakova, Δp. Glavni razlog je što se sama funkcija pseudo-tlaka, prvenstveno koristi u svrhu točnijeg određivanja dinamičkih tlakova, što je najčešće slučaj kod određivanja gradijenata dinamičkih tlakova u uzlaznim cijevima bušotina. Njihov izračun puno više ovisi o promjeni PVT svojstava plina nego što je to slučaj u naftnim bušotinama. Uvođenjem funkcije pseudo-tlaka omogućeno je točnije određivanje ukupnog gradijenta dinamičkog tlaka uzduž kolone uzlaznih cijevi, jer ova funkcija po svakom segmentu bušotine uzima u obzir i promjenu osnovnih fizikalnih svojstava plina, koje uvelike ovise o promjeni tlaka po dubini bušotine (Rahman et al., 2006). Kada se radi o protoku plina u ležištu i analognom određivanju promjene porasta tlaka u ležištu tijekom ispitivanja, također se primjenjuje izvorni oblik funkcije pseudo-tlaka, koja u SI sustavu ima jedinicu ($Pa^2/Pa{\cdot}s=Pa/s$). Izveli su je Al-Hussainy et al. u radu iz 1966. godine, a jednadžba je već navedena pod brojem (2.4):

$$m(p) = 2\int_{p_0}^{p} \frac{p}{\mu Z}\, dp$$

Rješenje ovog integrala može se analitički aproksimirati ako se funkcija $p/\mu Z$ izvuče ispred integrala, pa glasi:

$$2\int_{p_0}^{p} \frac{p}{\mu Z}\, dp = \frac{2}{\mu Z}\left(p^2 - p_o^2\right) \tag{4.1}$$

Ovo rješenje korišteno je kod pretvorbe jedinice na ordinati odabranog testa porasta iz $((10^6 psi^2/cp)/MMscfd)$ u jedinicu bar^2. Pritom su iz originalnog rada korištene srednje vrijednosti za viskoznost, μ, i za faktor plina, Z, navedene u tablici 2.

Ordinata testa porasta tlaka u ovom radu izražena je s više parametara tj. s izrazom, $\Delta m(p)/q$, jer je taj oblik neophodan za određivanje propusnosti ležišne stijene njihovom metodom. S obzirom da taj oblik ordinate u sebi uključuje nekoliko parametara kao što su protok, q, i osnovna, promjenjiva fizikalna svojstva plina unutar funkcije pseudo-tlaka, poput viskoznosti, μ, i Z faktora, on nije pogodan za razlučivanje novih matematičkih poveznica, radi svoje složenosti. U sljedećim koracima metode je pokazano da se jednostavnijim oblikom tlaka na ordinati mogu dovoljno točno izvesti nova rješenja za određivanje nepoznatog područja stabilizacije tlaka na krivulji porasta, bez da se uvodi vrlo složena funkcija razlika funkcije pseudo-tlakova, $\Delta m(p)$. Stoga je za parametar ordinate odabrana razlika tlakova, Δp:

$$\Delta p = p_{ws}^2 - p_{wf}^2 \tag{4.2}$$

gdje je, p_{ws}, izmjereni tlak u određenom vremenu nakon zatvaranja bušotine, a p_{wf} je tzv. nulti tj. početni tlak krivulje porasta, koji bi u idealnom slučaju trebao biti ekvivalentan zadnjem dinamičkom tlaku u bušotini prije njenog zatvaranja.

U fazi izrade nove metode ispitana je i krivulja tzv. 'sirovog' tj. mjerenog tlaka, p_{ws}, izražena u jedinici bar, ali ovaj oblik za plinska ležišta nije toliko pogodan kao razlika kvadrata tlakova, Δp. Isto tako, ispitana je i krivulja kvadrata tlakova, p^2_{ws}, koja iz istog razloga u ovom slučaju nije prihvatljivija od krivulje razlike kvadrata tlakova. Prednost krivulje razlike kvadrata u odnosu na ova dva matematička oblika ordinate je jednostavnije određivanje područja skladištenja fluida na log-log dijagramu testa porasta, čiji je značaj, kao zasebni korak metode, pojašnjen u nastavku. Ove činjenice su jasnije ukoliko se sve parametre ordinate zajednički grafički usporedi, pa su stoga na slici 48 prikazana četiri izdvojena oblika u ovisnosti o istom proteklom vremenu nakon zatvaranja bušotine, odnosno u ovisnosti o vremenu trajanja testa porasta tlaka, Δt, izraženog u satima.

Pregled svih vrijednosti tlakova za sve oblike ordinate testa porasta tlaka dan je u tablici u već navedenom prilogu 1, pa je u tablici 3, samo radi orijentacijskog uvida u iznose tlakova i vremena, ovdje izdvojen opis svih stupaca zajedno s prvim i zadnjim retkom. Prvi redak se odnosi na vrijeme prvog izmjerenog tlaka nakon zatvaranja bušotine, a zadnji redak tablice na zadnji izmjereni tlak testa porasta.

Tablica 3: Početni i krajnji tlak testa porasta za četiri različite ordinate na slici 48

Δt	**Δp**	**Δm(p)/q**	**p_{ws}**	**p^2_{ws}**
(h)	(bar^2)	10^6 x ((psi^2/cp)/MMscfd)	(bar)	(bar^2)
0,0028	25,32	0,387	26,69	712,12
643	10010,15	150	103,43	10696,60

U prvom stupcu tablice 3 nalazi se proteklo vrijeme testa porasta tlaka u satima, koje je bilježeno ukupno 254 puta, što se također vidi u opširnijoj tablici u prilogu 1. Iako suvremena oprema za ispitivanje bušotina omogućuje puno veću frekvenciju snimanja, ovaj broj mjerenja tlaka tijekom vremena je dovoljan za točnost metode. Ova napomena je bitna eventualnim korisnicima metode na budućim testovima porasta, jer se pri njenom razvoju željelo omogućiti korištenje osnovne verzije programa Excel, u kojem je za tabelarne proračune s puno više od 255 redaka potreban studiozniji pristup programiranja. U sljedećem stupcu je odabrani izraz za ordinatu metode, odnosno razlika kvadrata tlakova, *Δp*, u jedinici bar^2. Nadalje, u 3. stupcu tablice je dana originalna skala za tlak iz citiranog rada. Koristeći rješenje integrala u jednadžbi (4.1) s vrijednostima pojedinih parametara iz tablice 2, u sljedećem stupcu je tzv. 'sirov' tj. mjereni tlak, p_{ws}, u barima, određen jednadžbom (4.3). U petom stupcu je njegov kvadrat, p^2_{ws} . Tek nakon toga bilo je moguće postaviti odabranu ordinatu log-log dijagrama, pa je radi točnosti račun za mjereni tlak porasta, p_{ws}, višestruko provjeren. Zaključeno je da se nulti tlak u iznosu od 26,21 bara i krajnji tlak od 103,43 bara slažu s istim vrijednostima i na drugom dijagramu (engl. '*history plot*') citiranog rada, koji u jedinici psi iznose 380 i 1520 psi. Jednadžba za preračunavanje tlaka iz stupca 3, u tlak naveden u 4. stupcu je:

$$p_{ws} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{q} \times 14042\right) + 144400} \times 0,06894 \qquad (4.3)$$

Ovu vrijednost može se provjeriti za iznos prvog očitanja s krivulje odabranog testa porasta tlaka od 0,387 (($10^6 psi^2$/cp)/MMscfd):

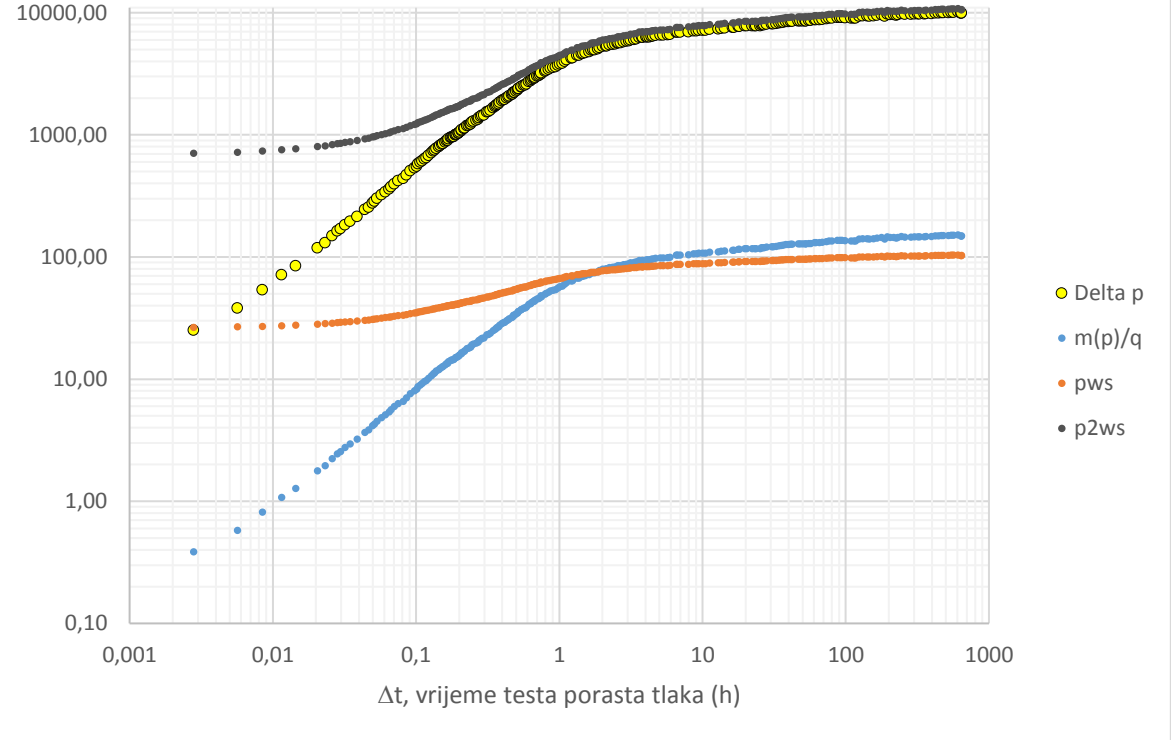
$$p_{ws} = \sqrt{(0,387 \times 14042) + 144400} \times 0,06894 = 26,6855 bar \qquad (4.4)$$

Tijekom daljnje provjere podataka ustanovljeno je da su autori u ovom radu koristili vrijednost konstantnog protoka plina prije zatvaranja bušotine u iznosu od 2,3E6 MMscfd = 83,34E+6 m^3/d, te navode da je on trajao 9 dana tj. 216 sati. To nije sasvim u skladu s

podacima za bilježeni protok na tzv. dijagramu *'history plot'*, pa su u tablicu 2 uneseni ispravni podaci. Međutim, očitanje vrijednosti nultog tj. dinamičkog tlaka na istom *'history plot'* dijagramu od 380 psi (26,206 bara) se potpuno slaže s proračunom pretvorbe jedinica. Iz te vrijednosti i s pomoću jednadžbe (4.2) lako je provjeriti i prvu vrijednost razlike kvadrata tlakova u tablici 3, koja je prebačena iz Excela i iznosi:

$$\Delta p = 26{,}68559^2 - 26{,}206^2 = 712{,}12 - 686{,}801 = 25{,}319 \text{ bar} \qquad (4.5)$$

Sve vrijednosti tlakova za četiri različite ordinate iz tablice 3 dane su zajedničkom skalom na istom log-log dijagramu (slika 48), radi boljeg uvida u oblike krivulja porasta tlaka i radi opisanih pojašnjenja za odabir parametra ordinate pri razvoju metode.



Slika 48: Usporedba utjecaja četiri parametra ordinate na oblik krivulje testa porasta

S dijagrama (slika 48) je vidljivo da trend odabranog parametra ordinate, označen žutom bojom, slijedi trend plave krivulje s originalnim podacima, što je logično jer se zbog pretvorbe jedinica u log-log sustavu radi o proporcionalnim vrijednostima. Prednost žute krivulje u odnosu na plavu je njen jednostavniji matematički oblik, što je iskorišteno kod daljnjih matematičkih transformacija u nastavku metode. Nadalje, nedostatak preostalih dviju krivulja, odnosno sive i smeđe u odnosu na odabranu žutu, je njihovo povijanje u

području skladištenja fluida. Odabir ovih, još jednostavnijih ordinata u konačnici metode ne bi bio jednostavniji, jer bi za određivanje područja skladištenja fluida trebalo uvesti dodatan korak u metodi.

4.3. Opis razvoja nove metode

Test porasta na slici 49 trajao je punih 27 dana (643 sati), jer se time očekivalo da će biti omogućen uvid u oblik krivulje porasta tlaka pri ulasku u područje stabilizacije, barem u jednom slabo propusnom ležištu. Stoga je razvoj metode išao u smjeru pronalaska novog inženjerskog pristupa za pouzdano prognoziranje područja početka stabilizacije tlaka (točka 3) u slučaju kada je krivulja porasta tlaka, slično kao i kod konvencionalnih ležišta, mjerena samo do četvrtog dana (točka 2) (tablica 4 i slika 49). Radi toga su na odabranom, cjelovitom testu najprije postavljene ove dvije ključne točke na krivulji porasta, kao prvi korak nove metode. Ideja se dalje razvijala u smislu da ako se u ovom testu temeljem poznatog tlaka u točki 2 (p_2) pouzdano zna matematički definirati koliki je tlak u točki 3 (p_3), i u kojem vremenu bi do njega došlo, Δt_3, onda će se ovu metodu moći primijeniti za prognoziranje tlaka, p_3, analizom svakog kratkog testa porasta, mjerenog samo do tlaka, p_2. Time je i određivanje propusnosti stijene slabo propusnog ležišta pouzdano, jer je omogućena primjena poznatih metoda za analizu testa porasta tlaka, isto kao da je test trajao punih mjesec dana ili dulje. Svi koraci za jedinstvenu primjenu ove metode su u nastavku opisani, matematički dokazani i teoretski obrazloženi.

4.3.1. Prvi korak - ključne točke na krivulji porasta tlaka

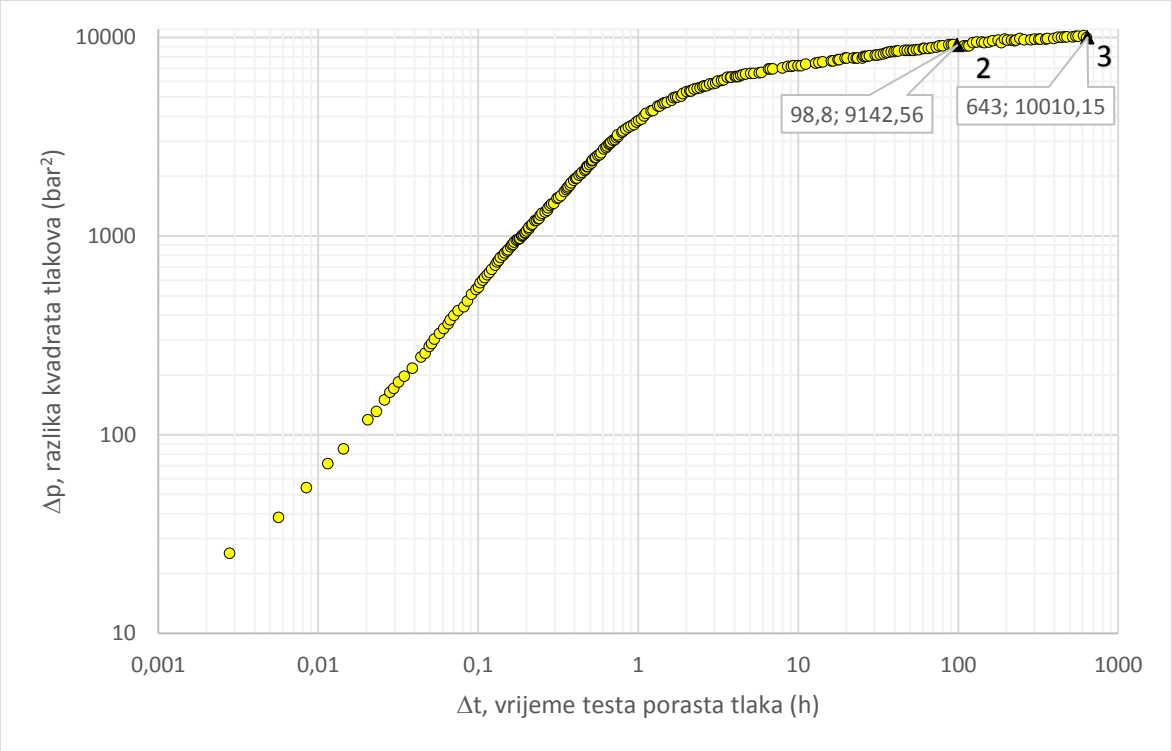
Prve dvije točke 2 i 3 na krivulji porasta tlaka (tablica 4 i slika 49) su polazište u primjeni metode za svaki budući kratki test. Odabrane su u optimalnim vremenima nakon zatvaranja bušotine, Δt_2 i Δt_3, jer su se ova vremena pokazala kao karakteristična u većini mjerenja, što ovu metodu u praksi čini dodatno prihvatljivom za izvođenje, radi jednostavnosti u pristupu. Za optimalno vrijeme mjerenja testa u točki 2 (Δt_2), uzeto je trajanje od četiri dana ili približno sto sati. Glavni razlog radi kojeg nije preporučljivo da on traje kraće, je mogućnost da u slabo propusnom ležištu tlak na log-log dijagramu testa porasta još nije izašao iz područja tzv. skladištenja fluida, pa matematički izvodi prikazani u nastavku, ne bi vrijedili. Osim toga, test u bušotini nekog slabo propusnog može trajati i dulje od četiri dana, ali to nije optimalno s ekonomskog aspekta, jer razvijena metoda nudi

pouzdano predviđanje tlaka u vremenu, Δt_3, i u kasnijim vremenima, već i na osnovu četverodnevnog mjerenja.

Tablica 4: Odabir ključnih točaka na krivulji porasta tlaka

Ključne točke	Oznake na krivulji	Optimalna vremena	Tlakovi
točka 2	(Δt_2; Δp_2)	Δt_2 = 4 dana	$p_2\,(\Delta t_2)$ = izmjeren
točka 3	(Δt_3; Δp_3)	Δt_3 = 27 dana	$p_3\,(\Delta t_3)$ = **nepoznat**

Za optimalno vrijeme u točki 3 (Δt_3), u ovom primjeru je radi matematički konciznog izvoda uzeto 27 dana, jer je mjerenje odabranog testa toliko i trajalo. U primjeni nove metode odabrano vrijeme, Δt_3, može biti i dulje, kao što je pokazano daljnjim razvojem metode. Međutim, optimalno ne bi bilo da vrijem, Δt_3, bude puno kraće od 27 dana, jer matematički izvodi nove metode također ne bi vrijedili, s obzirom da nema drugog teoretskog obrasca po kojem bi se sa sigurnošću moglo procijeniti kada u slabo propusnom ležištu dolazi do tzv. početka stabilizacije tlaka, osim analogije s odabranim testom za razvoj ove metode.



Slika 49: Početne točke na krivulji porasta tlaka

U skladu s općim izrazima ključnih parametara točki 2 i 3, postavljenim kao optimalnim za prvi korak metode u tablici 4, stvarne vrijednosti točki 2 i 3 na krivulji

odabranog testa porasta izdvojene su u tablici 5 i prikazane na slici 49. Izmjereno vrijeme testa u točki 2 je 98,8 sati, jer je to u konkretnom testu najbliže optimalnom vremenu od točno 4 dana, odnosno od 96 sati. Analogno tomu, vrijeme testa u točki 3 je 643 sata, jer je to zadnja izmjerena točka odabranog testa, koji je trajao par sati kraće od ukupno 27 dana. U oba slučaja tlakovi su poznati, ali je metoda razvijana s ciljem da se može primijeniti upravo i kada tlak o točki 3 nije poznat, odnosno za svaki kratki test porasta optimalnog trajanja od četiri dana ili približno 100 sati.

Tablica 5: Ključne točke na krivulji testa porasta tlaka za razvoj metode

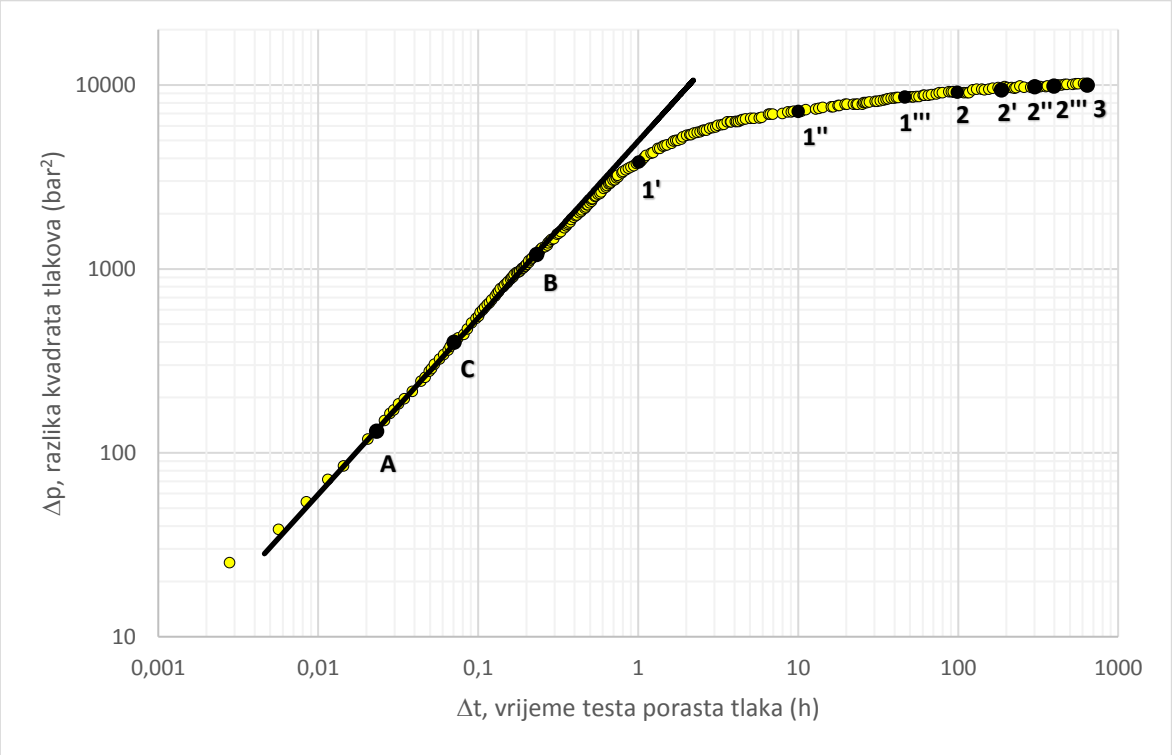
Točke	**Oznake**	**Krivulja, Δp (h, bar^2)**	**Mjereni tlak, p_{ws} (bar)**
2	(Δt_2; Δp_2)	(98,8; 9142,56)	99,14
3	(Δt_3; Δp_3)	(643; 10010,15)	**103,43**

4.3.2. Drugi korak – period skladištenja fluida i pomoćne točke na krivulji

Utjecaj bušotinskog efekta skladištenja fluida na krivulju testa porasta tlaka, do kojeg dolazi nakon zatvaranja bušotine, opisan je ranije, kao i načini njegovog određivanja. U log-log dijagramu to je pravac nagiba jedan, koji se postavlja preklapanjem (engl. *matching*) s početnim dijelom krivulje porasta, što je prikazano crnom linijom na slici 50. U svim dosadašnjim metodama ova faza se smatra nepoželjnom, jer je radi ovog efekta potrebno i dulje trajanje testa da bi došlo do tzv. stabilizacije tlaka za primjenu tzv. PTA analize (engl. *Pressure Transient Analysis*). Međutim, i u ovom koraku metode pristup je suprotan, jer su sljedeće tri temeljne točke postavljene na krivulju porasta upravo uzduž perioda njenog podudaranja s pravcem skladištenja fluida (slika 50). To su točke A, B i C, a zajedno s pomoćnim točkama od 1' do 1''' i od 2' do 2''' izdvojene su iz testa u prilogu 1 i dane u tablici 6. Razlozi za njihov odabir i poveznica s određivanjem tlaka u početnoj fazi stabilizacije, p_3, (tablice 4 i 5) temeljem kratkog testa porasta od približno četiri dana, mjerenog do, $p_2\,(\Delta t_2)$, opisani su u nastavku.

Tablica 6: Odabrane točke na krivulji porasta za razvoj metode

Δt (h)	Δp (bar^2)	točke
0,0232	131,47	A
0,232	1201,24	B
0,0706	399,74	C
1,01	3823,94	1'
10	7207,42	1"
46,5	8608,86	1"'
98,8	9142,75	2
187	9409,69	2'
301	9810,10	2"
397	9876,83	2"'
643	10010,31	3



Slika 50: Period skladištenja i odabrane točke na krivulji porasta za razvoj metode

Točka A nalazi se na krivulji u prvom dijelu perioda skladištenja fluida, ali ne sasvim na početku perioda, dok je točka B smještena pri završetku faze skladištenja. Analogno točki A, pomaknuta je od kraja prema sredini trajanja skladištenja, jednako toliko koliko je i A udaljena od početka prema sredini, gdje je postavljena točka C. Svrha ovog rasporeda točki

po krivulji porasta tijekom perioda skladištenja je ispitivanje utjecaja položaja točke na točnost krajnjeg rezultata metode, kako bi se dokazalo da je odgovarajućim postavljanjem temeljne točke, metoda u konačnici pouzdana za primjenu. Već je naglašeno da je glavna novost pristupa povlačenje novih pravaca koji povezuju ključne točke na krivulji porasta u log-log dijagramu (slika 51). Time su postavljeni novi nagibi iz kojih su izvedene zakonitosti u novom dijagramu, koji daje ovisnost razlike kvadrata tlakova, Δp, o nagibima, m_i, čime je potvrđena i početna ideja za razvoj metode (slika 53). Na taj način se došlo do nove mogućnosti određivanja početnog ležišnog tlaka, p_i, a time i do traženih rješenja za određivanje područja stabilizacije tlaka, odnosno za određivanje tlaka, p_3, tj. točke 3, ali i tlakova u još kasnijoj fazi krivulje porasta. Ovim pristupom je neposredno omogućeno i određivanje propusnosti stijene u slabo propusnim ležištima prilagodbom postojećih metoda, razvijenih za analizu testova porasta u konvencionalnim ležištima plina, što će biti pokazano kasnije. Stoga je u ovom koraku najprije potrebno obrazložiti koji utjecaj imaju položaji temeljnih točaka A, B i C na točnost rezultata, odnosno na određivanje tlaka, $p_3\,(\Delta t_3)$, koji se u budućoj primjeni metode smatra nepoznatim.

Osim navedene tri točke, u istraživanju je bilo uključeno još nekoliko točaka uzduž perioda skladištenja. Ovdje je, radi usporedbe rezultata, ista procedura ponovljena samo za ova tri karakteristična slučaja, što je opisano u sljedećem koraku. U proceduri se na specifičan način matematički povezuje svaku pojedinu točku iz perioda skladištenja (A, B, C) s ostalim odabranim točkama na krivulji porasta. Te pomoćne točke su najprije proporcionalno raspoređene po dijelu krivulje porasta nakon perioda skladištenja, između vršne točke B i ključne točke 2, do koje se svaki potencijalni test mjeri. To su točke 1', 1" i 1'". Na preostalom dijelu krivulje porasta, između ključnih točaka 2 i 3, koji se odnosi na početak područja stabilizacije tlaka, također su proporcionalno raspoređene pomoćne točke 2', 2" i 2'". Specifičnost ovog pristupa nije u samoj primjeni matematike, već i u poznavanju proizvodnog i ležišnog inženjerstva nafte i plina. Svojstvo neprekidnosti svake krivulje, pa tako i krivulje porasta tlaka, ukazuje da je svaka točka testa neminovno povezana sa svakom drugom točkom krivulje i vjerojatno je da osim ove nove metode postoji još neotkrivenih poveznica, koje o ležišnim svojstvima mogu puno toga otkriti. S tim u vezi je i pojašnjenje da područje skladištenja nije potrebno izdvajati, nego ga se ovakvim pristupom smatra upravo jednako važnim kao i svaki drugi dio krivulje porasta. Stoga se ne može pogriješiti, ako se odabere odgovarajući matematički jezik za povezivanje dviju točaka na krivulji log-log dijagrama, a u ovom slučaju to je specifična primjena oblika jednadžbe potencije. Njena prednost je što se na log-log dijagramu prikazuje pravcem, koji je pogodniji za izvode novih

zakonitosti od krivulja, karakterističnih za eksponencijalni, linearni ili neki drugi matematički oblik. Iz osnovne definicije jednadžbe potencije:

$$y = m_i * x^n \quad (4.6)$$

su za nadogradnju metode očitani nagibi, m_i, svih položenih pravaca. Oni se postavljaju iz svake odabrane točke na periodu skladištenja (A, B, C) do svih preostalih odabranih točaka na krivulji (1', 1", 1'", 2, 2', 2", 2'", 3), što je izvedeno u sljedećem koraku (slike 51, 54 i 57). Stoga je najprije dokazano da položaj točke A daje najtočnije rezultate za procjenu početnog ležišnog tlaka, p_i, u odnosu na točke B i C. Iz tog razloga je za buduću primjenu dovoljno odabrati samo točku A na početku perioda skladištenja i povezati je s ostalim pomoćnim točkama, radi očitanja nagiba svih pravaca, prema postavljenim jednadžbama potencije (4.6). Iako postoje poznate metode za određivanje početnog ležišnog tlaka, p_i, ovaj novi način je neophodan u ovoj metodi radi nadogradnje određivanja tlaka, p_3, kao i tlakova iz kasnije faze mjerenja, za čije određivanje ne postoji druga jedinstvena metoda u slabo propusnim ležištima.

Osim navedenog, postoji i dodatna prednost uporabe matematički relativno jednostavnog oblika jednadžbe potencije u istraživanju log-log dijagrama testa porasta tlaka. To je mogućnost njihovog određivanja i provedbe cijele metode u programu Excel. Tijekom razvoja ideje to je, također, bio jedan od ciljeva, jer je time omogućena dostupnost metode, bez dodatnih ležišnih simulacija, s obzirom da se tek nakon provedbe svih koraka test može analizirati i u nekom od poznatih softvera, kao što je Saphir. Osim toga, točnost rezultata dobivenih u ovom koraku primjenom jednadžbi potencije koje se postavljaju programom Excel je neupitna. To se odnosi na osjetljivost njenih parametara, a posebno na utjecaj potencije, koju program postavlja u četvrtoj decimali.

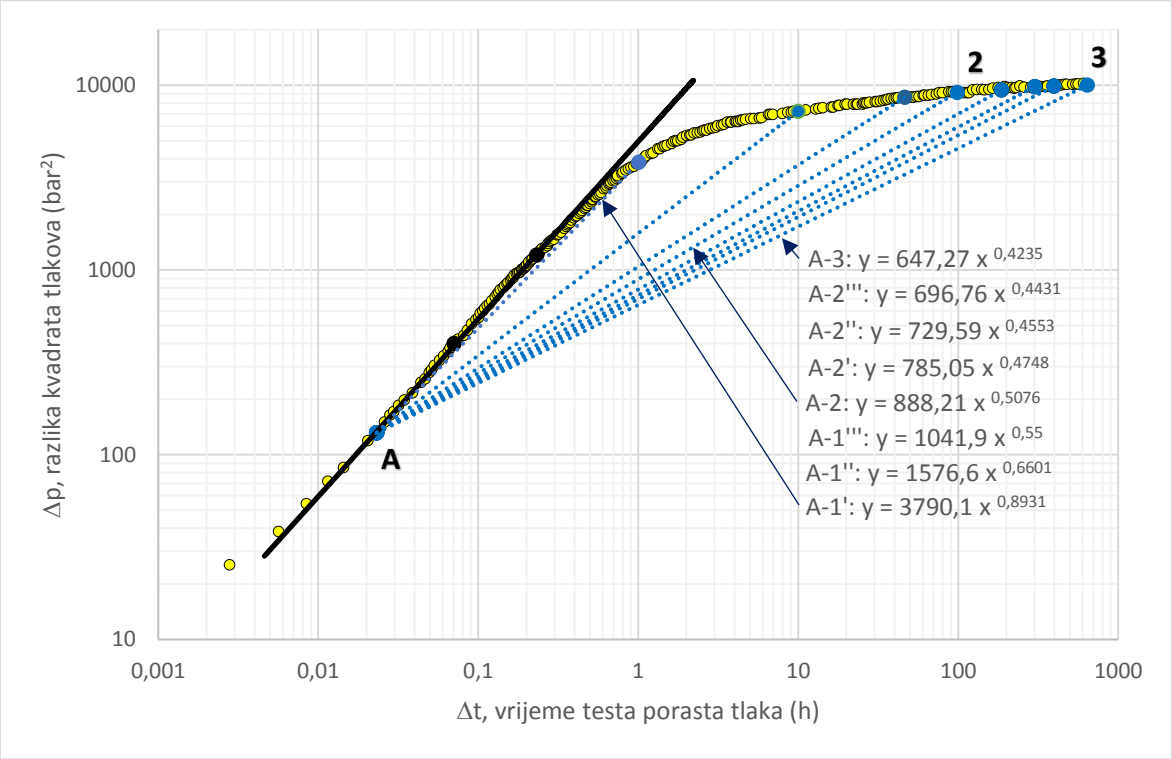
4.3.3. Treći korak – određivanje nagiba s pomoću novih (m_i, Δp)-dijagrama

Na slici 51 je iz točke A povučeno ukupno osam pravaca do odabranih točaka na krivulji porasta, počevši s pomoćno točkom 1' pa sve do točke 3. Za njih su određene jednadžbe potencije, a sve su istaknute i na log-log dijagramu. Pritom se prva jednadžba, s nagibom u iznosu od 3790,1 odnosi na pravac od točke A do točke 1':

$$y = 3790{,}1\ x^{0{,}8931} \quad (4.7)$$

Iz svih osam izraza očitani su nagibi pravaca, $m_{i=1-8}$, kojima su u tablici 7 pridružene vrijednosti razlike kvadrata tlakova, Δp, za svaku točku krivulje porasta.

Za tablicu 7 je važno napomenuti da se točke od 1. do 4. retka nalaze na krivulji porasta svakog budućeg četverodnevnog testa. Ostali retci, od 5. do 8. se odnose na tzv. nepoznato područje krivulje porasta tlaka, koje je u odabranom testu porasta za plinsku bušotinu na ležištu šejla Eagle Ford djelomično izmjereno (slika 64). Isto vrijedi i za retke tablice 8 i 9, koje se odnose na procedure za točke B i C, provedene sukladno proceduri za točku A u nastavku.

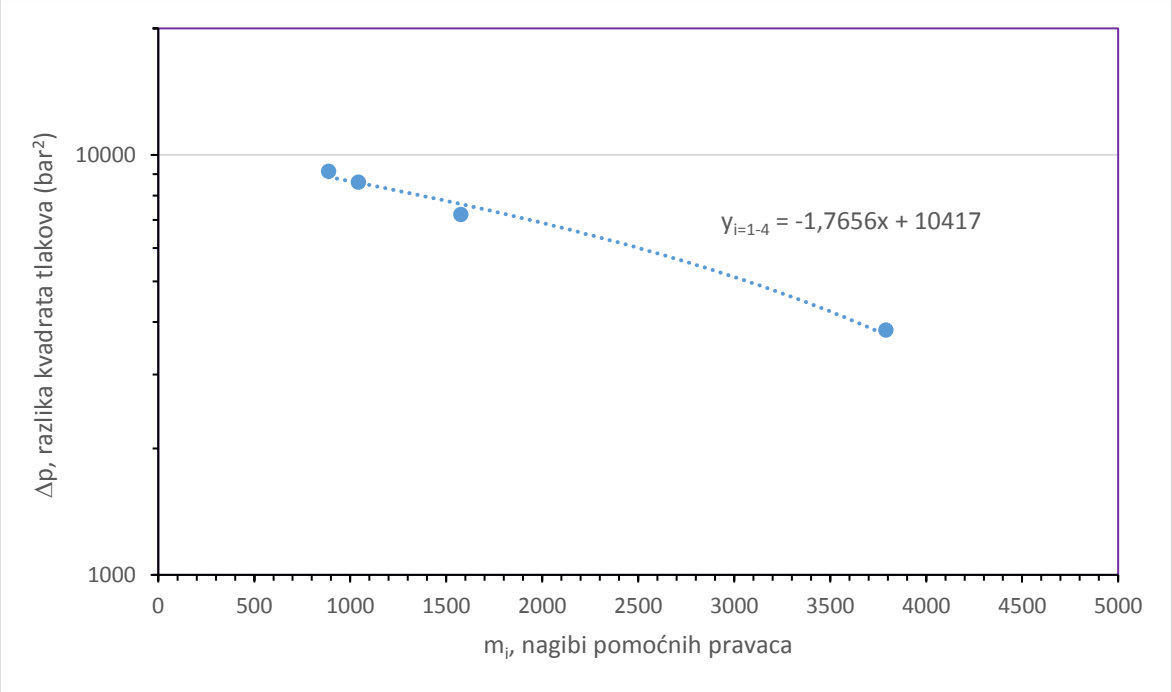


Slika 51: Određivanje nagiba pravaca od točke A do odabranih točaka na krivulji porasta

Tablica 7: Očitani nagibi pravaca od točke A do odabranih točaka na krivulji porasta

	$m_{i=1-8}$	Δp (bar^2)	pravci
1	3790,1	3823,94	A-1'
2	1576,6	7207,42	A-1''
3	1041,9	8608,86	A-1'''
4	888,21	9142,75	A-2
5	785,05	9409,69	A-2'
6	729,59	9810,10	A-2''
7	696,76	9876,83	A-2'''
8	647,27	10010,31	A-3

Za ključnu točku A je postavljena nova funkcionalna ovisnost između tlaka, Δp, i nagiba, m_i, u polu-logaritamskom dijagramu (slika 52). Nakon istraživanja koordinatnih sustava i matematičkih oblika funkcija pogodnih za dobivanje rješenja početnog ležišnog tlaka, p_i, a onda i ostalih tlakova u području stabilizacije od, p_3 na dalje, za ovu fazu metode je odabrana linearna funkcija. Ona je detaljno analizirana u lin-lin dijagramu (slika 53).



Slika 52: Linearna aproksimacija za nagibe pravaca iz točke A

Linearnom jednadžbom općeg oblika:

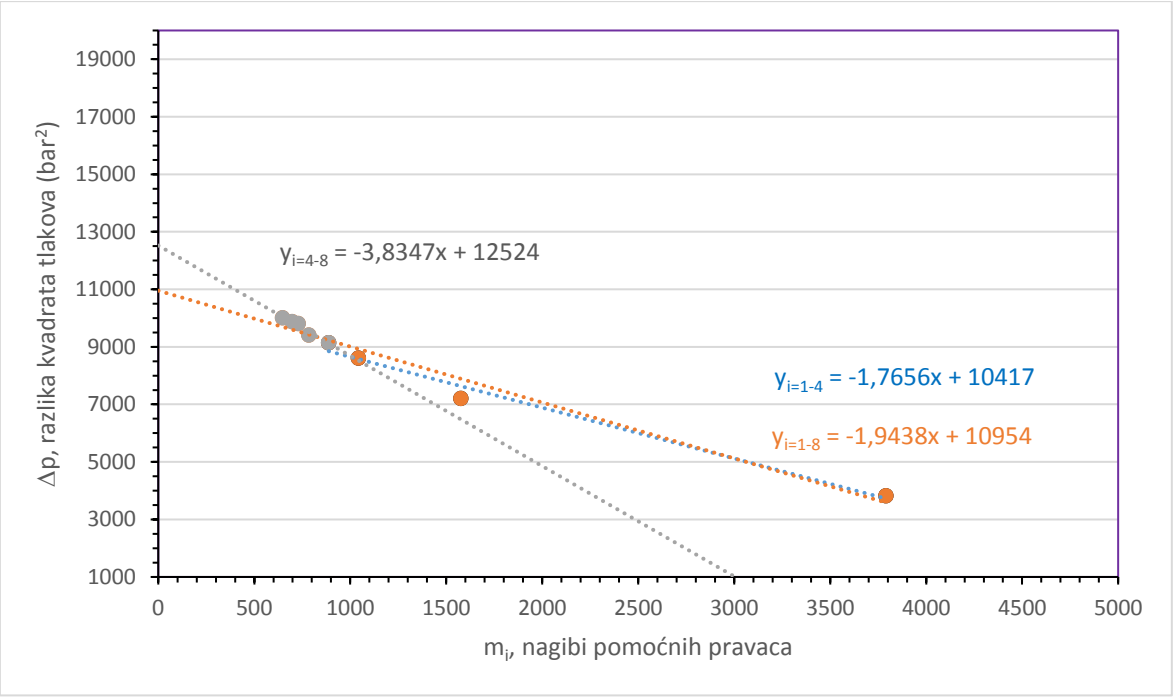
$$y = -a_i * m_i + y_{0i} \quad (4.8)$$

su najprije aproksimirane prve četiri točke iz tablice 7, što je u skladu s primjenom na buduće kratke testove porasta, jer se 4. redak odnosi na točku 2, odnosno na završetak trajanja četverodnevnog testa tj. na vrijeme od približno 100 sati mjerenja. U ovu svrhu nije potrebna detaljnija statistička analiza točnosti da bi se utvrdilo kako je sama aproksimacija ($y_{i=1-4}$) relativno zadovoljavajuća s obzirom da je obuhvaćen kratak perioda ispitivanja. No, također se uočava da drugi član jednadžbe (4.8), odnosno, y_0, iznosi 10417 bar^2. On se odnosi na odsječak na ordinati iz kojeg se određuje, tj. u ovom slučaju potvrđuje početni ležišni tlak, p_i, pa se jednadžbu (4.8) može pisati i u obliku:

$$\Delta p = -a_i * m_i + \Delta p_i \quad (4.9)$$

Iz podataka za ležište Eagle Ford (tablica 2) je poznato da, p_i, iznosi 113,8 bara, pa prema jednadžbi (4.2), razlika kvadrata tlakova, Δp_i, treba biti 12263,64 bar^2. To ne znači da će se aproksimaciju ($y_{i=1-4}$) odbaciti, jer ne presijeca ordinatu na 12263,64 bar^2 nego na vrijednosti nižoj od početnog tlaka, p_i. Baš nasuprot, modeliranjem njenih parametara, $a_{i=1-4}$ i $y_{0,\ i=1-4}$, (tablica 8) će se segment po segment, preko aproksimacije linearne jednadžbe ($y_{i=1-8}$) doći do točne aproksimacije ($y_{i=4-8}$) za početni ležišni tlak, p_i, tj. za nepoznato područje krivulje porasta i buduću primjenu metode. Segmenti se u ovom slučaju odnose na tri različito promatrana vremenska perioda, iako je u ovoj funkcionalnoj ovisnosti parametar trajanja testa, Δt, nevidljiv. Ovaj problem pri povezivanju ovisnosti nagiba pravaca, m_i, s trajanjem testa, Δt, je riješen u sljedećem koraku razvoja metode. Bez obzira na to, u ovom koraku je dovoljno raščlaniti segmente prema tablici 7, tako da se prvi odnosi na period s poznatim podacima (1-4), sljedeći se odnosi na ukupan period testa, dakle i na poznati i na nepoznati dio podataka zajedno (1-8), te na krajnji segment samo s nepoznatim podacima (4-8). Cilj metode je doći do poznavanja nepoznatog segmenta (4-8) samo na temelju podataka poznatog segmenta (1-4). Ovu proceduru se ne može nazvati niti simulacijom niti prognoziranjem krivulje porasta, jer se sastoji od koraka koji u sebi sadrže primjenu puno opširnijih poveznica od simulacija ili nelinearnih regresija, koje su zastupljene u ostalim metodama za analizu testova porasta tlaka u slabo propusnim ležištima.

Radi jednostavnijeg pregleda modeliranih parametara linearnih jednadžbi u svrhu postizanja konačnog izraza metode za aproksimaciju jednadžbe ($y_{i=4-8}$), podaci sa slike 52 su prebačeni u lin-lin dijagram (slika 53). Rasponi iznosa očitanih nagiba, m_i, i pridružene im razlike kvadrata tlakova, Δp, nisu veliki, pa je i iz tog razloga logaritamsku skalu moguće potpuno isključiti u ovom dijelu izvoda metode. Iz slike 53 je vidljivo da se nakon aproksimacije ($y_{i=1-4}$) postavlja jednadžba za sljedeći segment ($y_{i=1-8}$) temeljem svih redaka iz tablice 7, odnosno do točke 3, tj. do područja stabilizacije tlaka na krivulji porasta. Problem je što se u budućoj primjeni metode na tzv. kratkim testovima neće raspolagati s ovim podacima, pa je stoga ovdje uvedena prva pretpostavka u metodi, koja može rezultirati manjim odstupanjima rezultata. U kasnijim koracima ipak je dokazano da ova pretpostavka, koja proizlazi iz modeliranja parametara jednadžbi prikazanih u tablici 8, vrijedi i općenito.



Slika 53: Lin-lin dijagram i početni tlak, p_i, određen pomoću nagiba pravaca iz točke A

Ukoliko se parametre linearnih aproksimacija s prvog i drugog segmenta ($y_{i=1-4}$) i ($y_{i=1-8}$) prikazane na slici 53 prikaže tabelarno (8), dobit će se jasniji uvid u dobivene faktore modeliranja, f1 i f2, koji u postotcima iznose 10% i 5%.

Tablica 8: Modelirani parametri linearnih jednadžbi sa slike 53

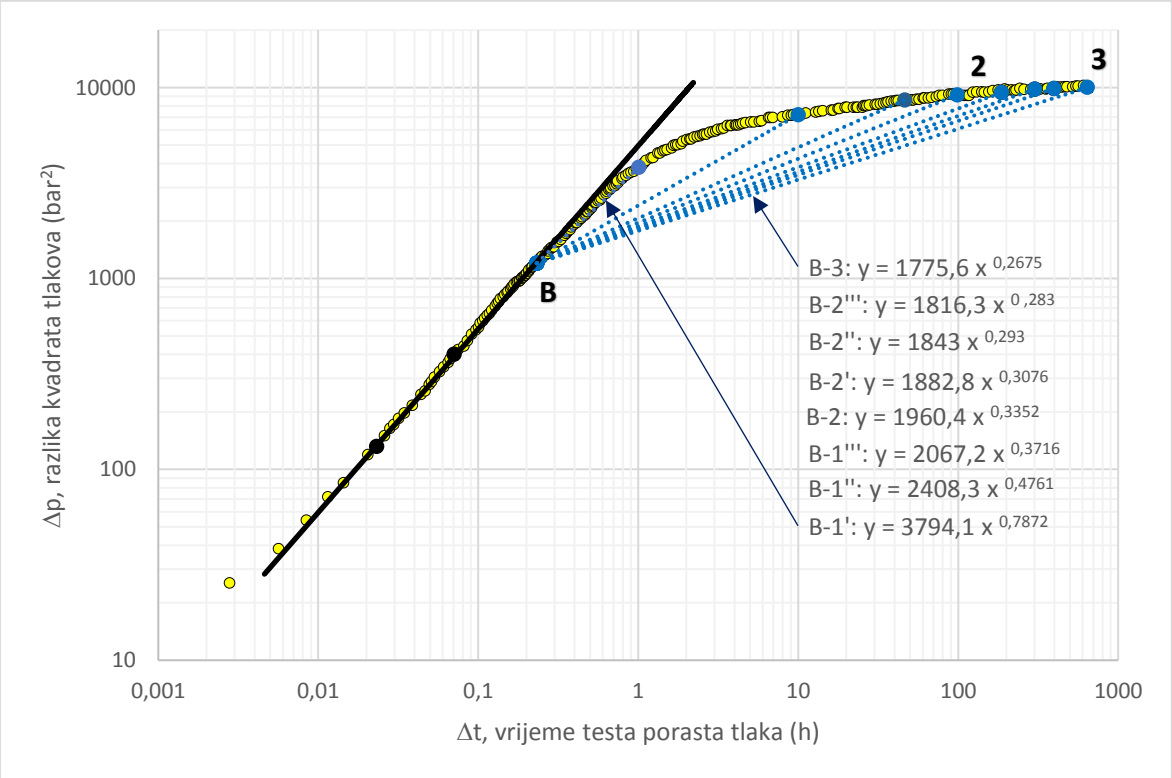
$a_{i=1-4}$	f1	$a'_{i=1-8} = f1 * a_{i=1-4}$	$y_{0,\ i=1-4}$	f2	$y'_{0,\ i=1-8} = f2 * y_{0,\ i=1-4}$
-1,7656	10%	-1,7656 * 1,1 = -1,9421	10417	5%	10417 * 1,05 = 10937

Iz tablice 8 je vidljivo da se parametri, $a'_{i=1-8}$ i $y'_{0,\ i=1-8}$, koji iznose -1,9421 i 10937, a koji su dobiveni modeliranjem parametara, $a_{i=1-4}$ i $y_{0,\ i=1-4}$, putem faktora, f1 i f2, gotovo ne razlikuju od izvornih vrijednosti sa slike 53, gdje iznose -1,9438 i 10954 za ($y_{i=1-8}$). Nakon modeliranja jednadžbe ($y'_{i=1-8}$) pravac se ekstrapolira do presijecišta s ordinatom, a onda se iz nje računaju samo točke od 4. retka na dalje. Na osnovu tih izdvojenih točaka se ispočetka aproksimira samo nepoznati segment ($y_{i=4-8}$). Kao što se vidi iz dijagrama na slici 53, treća aproksimacija presijeca ordinatu na vrijednosti 12524 bar^2. To je vrlo približna procjena početnog ležišnog tlaka, p_i, sa samo malim odstupanjem, jer bi u ovom slučaju on iznosio 114,9 bar. Za ovaj segment je potpuno nevažno što jednadžba ($y_{i=4-8}$), označena sivom

linijom, ne aproksimira točke početnog segmenta, koje se odnose na period skladištenja, jer slično Hornerovoj metodi, u ovoj konačnoj transformaciji to nije niti svrha. Iz ovog pojašnjenja proizlazi i dodatno obrazloženje činjenice, da je osim novog matematičkog pristupa u log-log dijagramu testa porasta potrebno dublje poznavanje ležišnog inženjerstva, jer se do rješenja dolazi alternativnim uključivanjem i isključivanjem utjecaja područja skladištenja fluida na krivulju porasta tlaka.

Prije primjene iste procedure za točke B i C treba napomenuti da su dobivene jednadžbe određene iz relativno malog broja točaka, ali je istraženo da postavljanje većeg broja pravaca ne bi rezultiralo većom točnošću rezultata. Stoga je ovdje izložen minimalno dovoljan broj pomoćnih točaka za izvod novih zakonitosti, kako bi i primjena metode ostala u suštini jednostavna, odnosno kako se ne bi bespotrebno širio tijek proračuna.

Analogno opisanoj proceduri za točku A, na slici 54 je iz krajnje točke s perioda skladištenja (B) povučeno također osam pravaca do odabranih točaka na krivulji porasta, od točke 1' do točke 3. I njih su određene jednadžbe potencije, prikazane na log-log dijagramu. Iz svih izraza očitani su nagibi pravaca, $m_{i=1\text{-}8}$, koji su za svaku točku pridruženi parametru razlike kvadrata tlakova, Δp, u tablici 9.

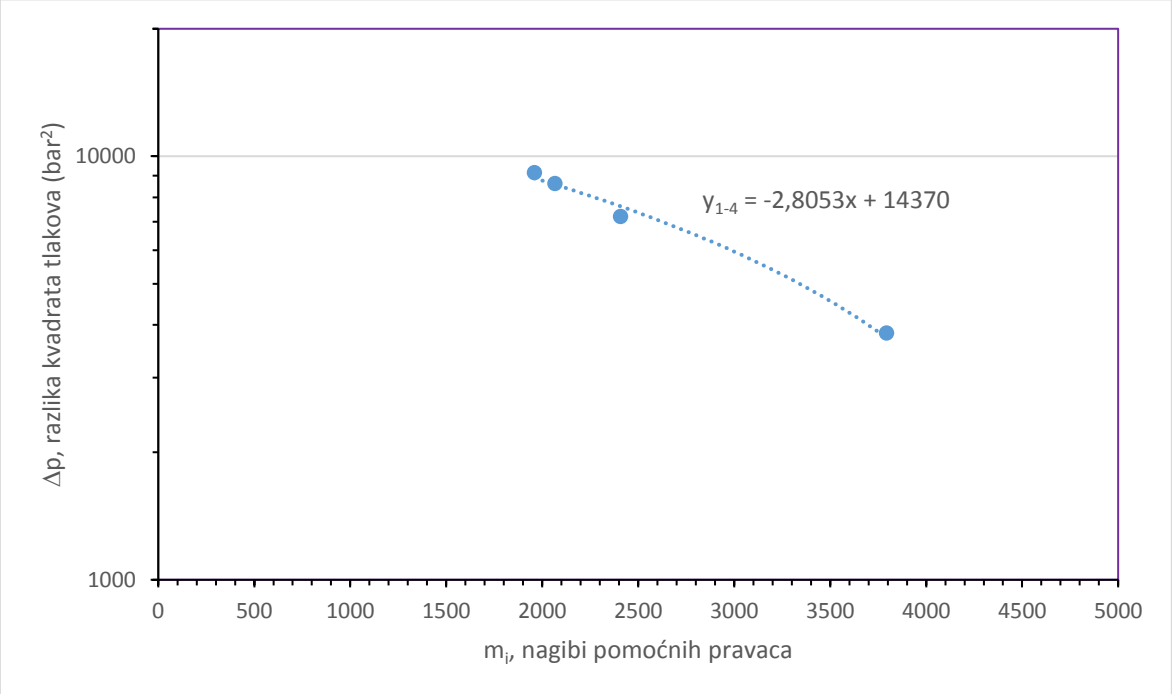


Slika 54: Određivanje nagiba pravaca od točke B do odabranih točaka na krivulji porasta

Tablica 9: Očitani nagibi pravaca od točke B do odabranih točaka na krivulji porasta

	$m_{i=1-8}$	Δp (bar^2)	pravci
1	3794,1	3823,94	B-1'
2	2408,3	7207,42	B-1"
3	2067,2	8608,86	B-1"'
4	1960,4	9142,75	B-2
5	1882,8	9409,69	B-2'
6	1843	9810,10	B-2"
7	1816,3	9876,83	B-2"
8	1775,6	10010,31	B-3

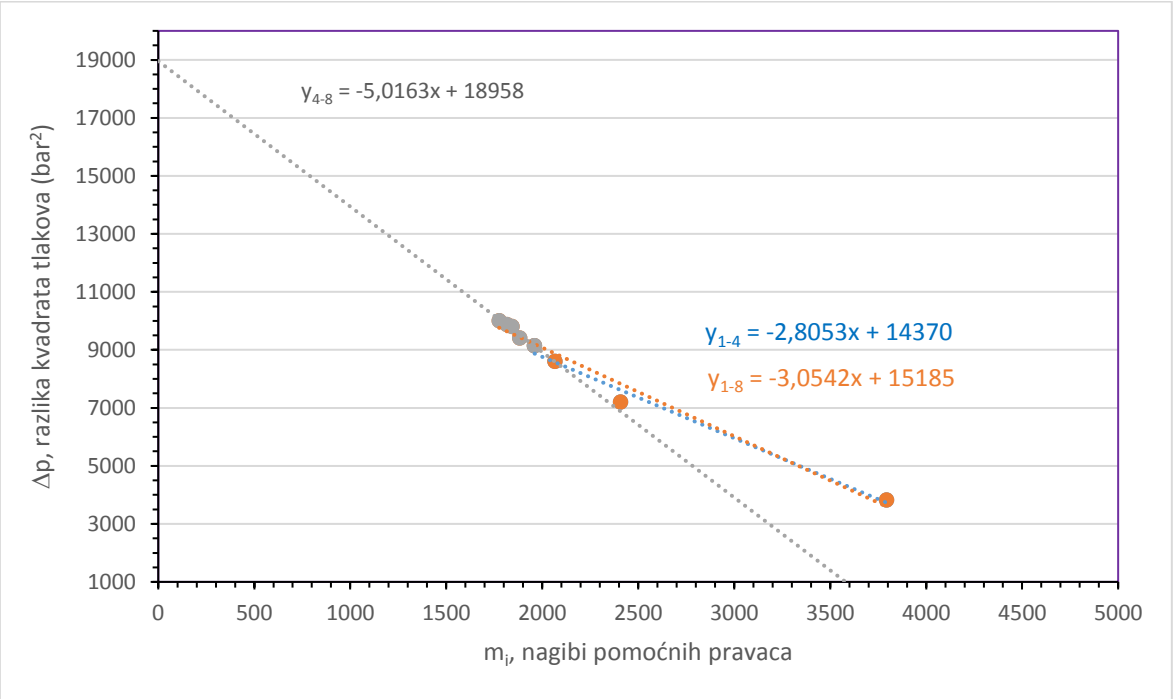
Za temeljnu točku B zatim je postavljena linearna funkcija između tlaka, Δp, i nagiba, m_i, u polu-logaritamskom dijagramu (slika 55), koja se nakon toga analogno kao kod procedure za točku A, analizira u lin-lin dijagramu (slika 56).



Slika 55: Linearna aproksimacija za nagibe pravaca iz točke B

Kao i u prethodno opisanoj proceduri za točku A, i ovdje su najprije aproksimirane prve četiri točke iz tablice 9, gdje se 4. redak također odnosi na završetak trajanja četverodnevnog testa. Na slici 55 se uočava da drugi član opće linearne jednadžbe (4.8), tj.

odsječak na ordinati, y_0, iznosi 14370 bar^2, što je znatno više od razlike kvadrata tlakova za, Δp_i, koja je 12263,64 ($y_{i=1-8}$). Niti ova aproksimacija ($y_{i=1-4}$) se ne odbacuje, već je iskorištena za analogno modeliranje parametara, $a_{i=1-4}$ i $y_{0,\,i=1-4}$, (tablica 10) u svrhu određivanja faktora modeliranja, f1 i f2. I ovdje se segment po segment, preko aproksimacije ($y_{i=1-8}$) dolazi do jednadžbe ($y_{i=4-8}$) za određivanje početnog ležišnog tlaka, p_i, koja za točku B ne daje zadovoljavajuću procjenu ($y_{0,\,i=4-8}$ = 18958 bar^2 $\Rightarrow$ p_i = 140,1 bar), ali ima važnu ulogu u daljnjem zaključivanju za razvoj metode. Radi pregleda modeliranih parametara u svrhu postizanja konačnog izraza za aproksimaciju jednadžbe ($y_{i=4-8}$), podaci su prebačeni u lin-lin dijagram (slika 56).



Slika 56: Lin-lin dijagram i početni tlak, p_i, određen pomoću nagiba pravaca iz točke B

Ukoliko se parametre aproksimacija prvog i drugog segmenta, ($y_{i=1-4}$) i ($y_{i=1-8}$), sa slike 56 prikaže tabelarno (10), dobit će se uvid u dobivene faktore modeliranja, f1 i f2. Oni su za točku B izvedeni radi usporedbe s istim faktorima iz procedura za točke A i C.

Tablica 10: Modelirani parametri linearnih jednadžbi sa slike 56

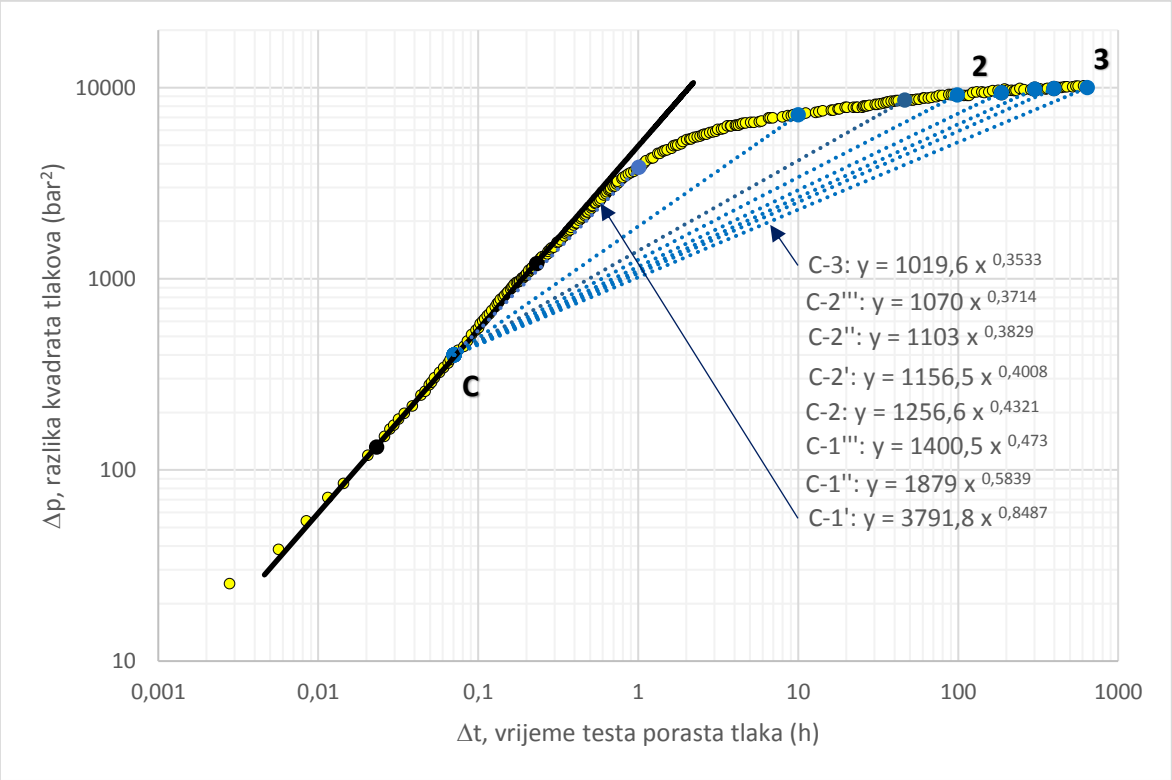
$a_{i=1-4}$	f1	$a'_{i=1-8} = f1 * a_{i=1-4}$	$y_{0,\,i=1-4}$	f2	$y'_{0,\,i=1-8} = f2 * y_{0,\,i=1-4}$
-2,8053	10%	-2,8053 * 1,1 = -3,0858	14370	5%	10417 * 1,05 = 15088,5

Iz tablice 10 proizlazi isto kao i iz tablice 8, da se parametri, $a'_{i=1-8}$ i $y'_{0,\ i=1-8}$, koji iznose -3,0858 i 15088,5 gotovo ne razlikuju od izvornih vrijednosti sa slike 56, gdje su im vrijednosti -3,0542 i 15185 za ($y_{i=1-8}$). Značaj postavljanja cijele procedure za točku B je potvrda iznosa istih faktora modeliranja, f1 i f2, kao i za točku A, koji su procijenjeni na 10% i 5%. Nakon modeliranja jednadžbe ($y'_{i=1-8}$) na identičan način se dolazi do aproksimacije za nepoznati segment ($y_{i=4-8}$).

Iako ona ne daje točnu procjenu početnog ležišnog tlaka, p_i, jer joj odsječak na ordinati puno veći od potrebnog, odavde slijedi i drugi značaj provedene procedure za točku B. To je poveznica sa zaključkom iz drugog koraka metode o odabiru položaja temeljnih točaka A, B i C, uzduž područja skladištenja na krivulji porasta. Njihov položaj značajno utječe na točnost rezultata metode, koja se u ovom koraku prvenstveno odnosi na potvrdu iznosa početnog ležišnog tlaka, p_i. Usporedbom provedenih procedura za točke A i B slijedi relativno neočekivani zaključak s aspekta ležišnog inženjerstva. Bolju procjenu tlaka, p_i, daje procedura provedena iz točke A, smještene na početku perioda skladištenja, nego točka B, čiji je položaj na kraju faze skladištenja. U svim dosadašnjim metodama teži se upravo suprotnom, a to je analizirati test porasta nakon efekta skladištenja. Nadalje, zaključivanjem s aspekta primijenjene matematike ne iznenađuje činjenica da je veća točnost rezultata postignuta procedurom provedenom temeljem točke A od procedure za točku B. S obzirom da se točka A nalazi na početku skladištenja, odnosno pri početku krivulje porasta, ona je, promatrano geometrijski, udaljenija od pomoćnih točaka na krivulji s kojima ju se povezuje pravcima, za razliku od točke B, koja je tim istim točkama bliže (slike 51 i 54). Odavde proizlazi da nagibi pravaca iz točke A kvalitetnije utječu na točnost rezultata metode, jer su ovi pravci geometrijski dulji od onih povučenih iz točke B. Time je dokazana i polazna ideja o postojanju nove zakonitosti koja proizlazi iz povezivanja pojedinih točaka neprekidne krivulje porasta, specifičnim matematičkim oblicima. Ova zakonitost potvrđuje spregu primjenjenog znanja ležišnog inženjerstva i elementarne matematičke analize, odakle slijedi konačan zaključak da je u provedbi nove metode dovoljno odabrati samo točku A na početku područja skladištenja i provesti opisanu proceduru do određivanja početnog tlaka, p_i.

Kako bi se to dodatno dokazalo, u nastavku je provedena i procedura za točku C, čiji je položaj na sredini perioda skladištenja. Ona je u odnosu na točku A bliža pomoćnim točkama s kojima ju se povezuje, a u odnosu na točku B, tim istim točkama je udaljenija. Sukladno tome, i rezultat koji će dati biti će lošiji od rezultata za proceduru iz točke A, ali bolji u odnosu na rezultate za točku B, no ipak nedovoljno prihvatljiv.

U nastavku je analogno točkama A i B, na slici 57 iz točke C povučeno osam pravaca do istih odabranih točaka na krivulji porasta, od točke 1' do točke 3. Za njih su također određene jednadžbe potencije, te su prikazane na log-log dijagramu. Zatim su očitani nagibi pravaca, $m_{i=1-8}$, koji su pridruženi razlikama kvadrata tlakova, za svaku točku u tablici 11.

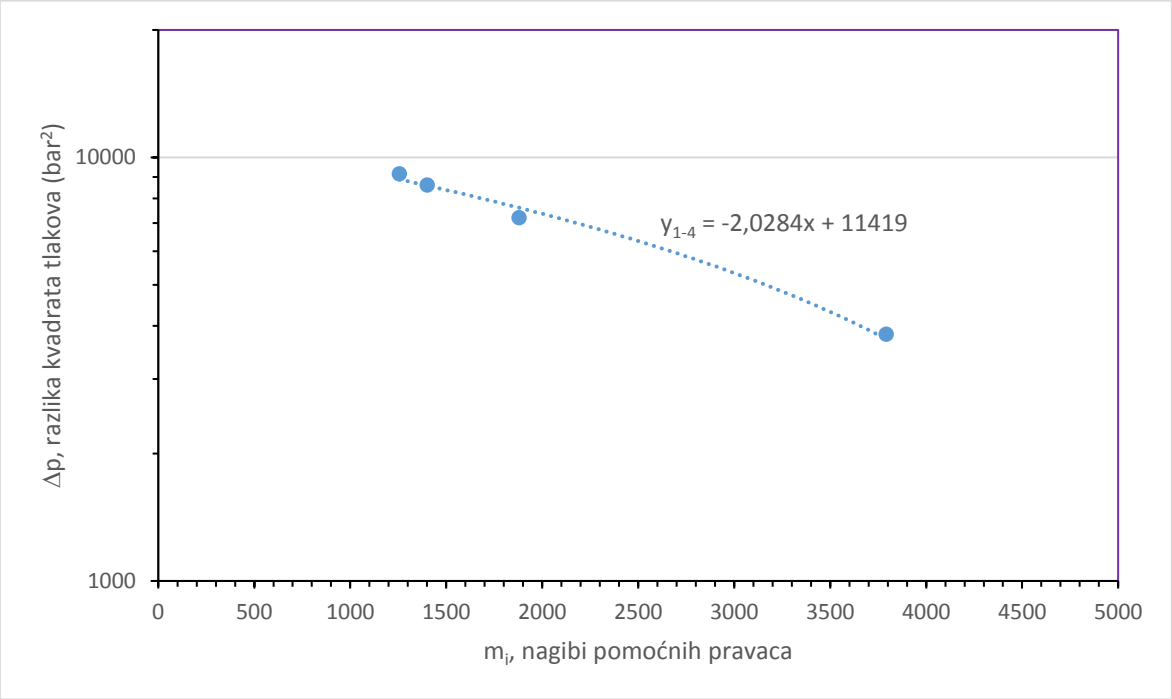


Slika 57: Određivanje nagiba pravaca od točke C do odabranih točaka na krivulji porasta

Tablica 11: Očitani nagibi pravaca od točke C do odabranih točaka na krivulji porasta

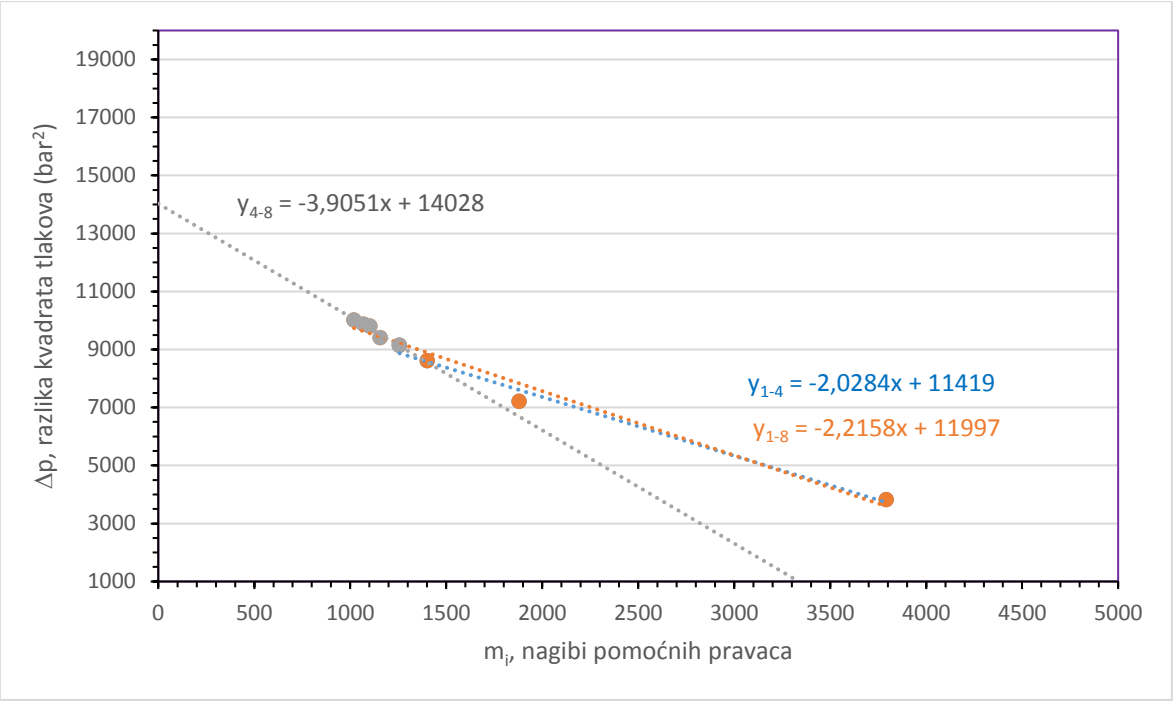
	$m_{i=1-8}$	Δp (bar²)	pravci
1	3791,8	3823,94	C-1'
2	1879	7207,42	C-1"
3	1400,5	8608,86	C-1"'
4	1256,6	9142,75	C-2
5	1156,5	9409,69	C-2'
6	1103	9810,10	C-2"
7	1070	9876,83	C-2"'
8	1019,6	10010,31	C-3

Za točku C je zatim postavljena linearna funkcija između tlaka, Δp, i nagiba, m_i, u polu-logaritamskom dijagramu (slika 58), koja se nakon toga analogno kao kod procedura za točke A i B, analizira u lin-lin dijagramu (slika 59).



Slika 58: Linearna aproksimacija za nagibe pravaca iz točke C

Kao i u prethodnim procedurama, najprije su aproksimirane prve četiri točke iz tablice 11. Na slici 58 se uočava da odsječak na ordinati, y_0, iznosi 11419 bar^2, što je nešto niže od razlike kvadrata tlakova za, Δp_i, koja treba biti 12263,64 bar^2. Ovu aproksimaciju ($y_{i=1-4}$) neće se odbaciti, nego također iskoristiti za modeliranje parametara, $a_{i=1-4}$ i $y_{0,\,i=1-4}$, (tablica 12), u istu svrhu određivanja univerzalnih faktora modeliranja, f1 i f2. I ovdje se segment po segment, preko aproksimacije ($y_{i=1-8}$) dolazi do jednadžbe ($y_{i=4-8}$) za određivanje početnog ležišnog tlaka, p_i, koja niti za točku C ne daje zadovoljavajuću procjenu ($y_{0,\,i=4-8}$ = 14028 bar^2 $\Rightarrow$ p_i = 121,3 bar) (slika 59). No, ova aproksimacija je bila značajna za razvoj metode kroz opisanu usporedbu s točkama A i B. Radi pregleda modeliranih parametara u svrhu postizanja konačne aproksimacije jednadžbe ($y_{i=4-8}$), podaci su također prebačeni u lin-lin dijagram.



Slika 59: Lin-lin dijagram i početni tlak, p_i, određen pomoću nagiba pravaca iz točke C

Ukoliko se parametre aproksimacija prvog i drugog segmenta, ($y_{i=1-4}$) i ($y_{i=1-8}$), sa slike 59 prikaže tabelarno (12), dobit će se uvid u dobivene faktore modeliranja, f1 i f2.

Tablica 12: Modelirani parametri linearnih jednadžbi sa slike 59

$a_{i=1-4}$	f1	$a'_{i=1-8} = f1 * a_{i=1-4}$	$y_{0,\ i=1-4}$	f2	$y'_{0,\ i=1-8} = f2 * y_{0,\ i=1-4}$
-2,0284	10%	-2,0284 * 1,1 = - 2,2312	11419	5%	11419 * 1,05 = 11990

Iz tablice 12 proizlazi isto kao i iz tablica 8 i 10, da se parametri, $a'_{i=1-8}$ i $y'_{0,\ i=1-8}$, gotovo ne razlikuju od izvornih vrijednosti sa slike 59. Značaj postavljanja cijele procedure za točku C, je isto kao i za točku B, u potvrdi iznosa istih faktora modeliranja, f1 i f2, koji kao i kod točke A iznose 10% i 5%.

Iz trećeg koraka metode proizlaze tri važna zaključka. Prvi je obrazložen nakon procedure za točku B. Odnosi se na dokazanu činjenicu da se kao jedinstveno pravilo u metodi uzima položaj točke A u postupku određivanja početnog ležišnog tlaka, p_i. Drugi zaključak je da u metodi ne postoje pretpostavke, jer je dokazana početna ideja o mogućnosti otkrivanja novih zakonitosti, koja je utemeljena na svojstvu neprekidne povezanosti svih točaka krivulje porasta. Kada ona ne bi vrijedila, ne bi bilo moguće na novi način odrediti

početni tlak, p_i. Treći dokazani zaključak je da se iznosi faktora modeliranja linearnih jednadžbi, f1 i f2, od 10% i 5% također uzimaju kao jedinstveno pravilo u primjeni metode na buduće testove. Pomoću njih se može doći do potpunog određivanja nepoznatog područja (slika 60) stabilizacije tlaka svakog testa porasta, bez potrebe dugotrajnog mjerenja.

U nastavku opisa metode razvijeni su koraci za određivanje vremena testa porasta u kojem je dosegnut tlak, $p_3\,(\Delta t_3)$, koji se u budućoj primjeni metode smatra nepoznatim, kao i za određivanje cijelog nepoznatog dijela krivulje porasta tlaka do tlaka izjednačavanja u ležištu.

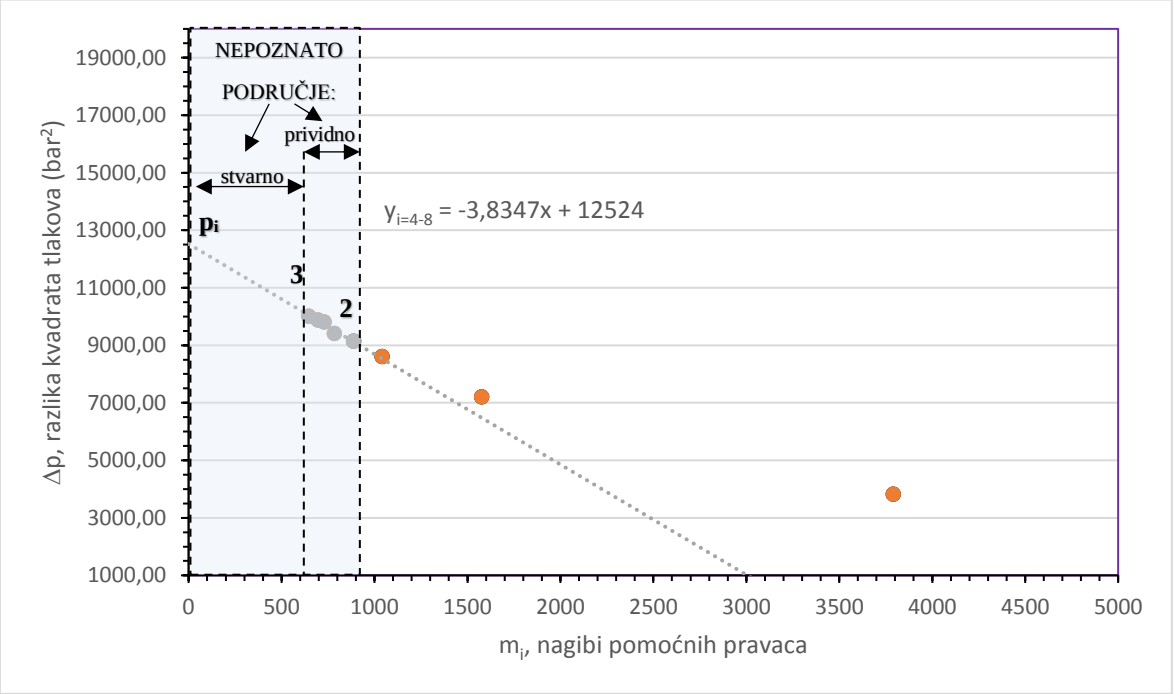
4.3.4. Četvrti korak – ekstrapolirane točke za krivulju porasta

U ovom koraku se do daljnjih rješenja dolazi nadogradnjom opisane procedure za točku A, dok su postupci provedeni za točke B i C u nastavku izostavljeni. Osim samog određivanja tlaka, $p_3\,(\Delta t_3)$, za ekstrapolaciju krivulje porasta u nepoznato područje tlaka u log-log dijagramu, najprije je potrebno odrediti nekoliko točaka na krivulji. Svrha ovog postupka je dobiti cjelovitost krivulje tj. njenu neprekidnost, barem u prvom dijelu nepoznatog područja. Bez toga nije moguće primijeniti poznate metode za određivanje propusnosti stijene, jer se one temelje i na derivaciji krivulje porasta u log-log dijagramu, a bez svojstva neprekidnosti krivulje, niti njena derivacija nije pouzdana. Osim toga, postojeće metode nisu primjenjive ukoliko nije dosegnut tzv. pseudo-radijalni protok u bušotini, koji se očituje i kao konstantan nagib derivacije krivulje porasta tlaka u nepoznatom području log-log dijagrama. Do ove konstante dolazi u trenutku dosezanja neograničeno djelujućeg radijusa bušotine, kao što je u početnom teoretskom dijelu rada opisano za vertikalnu bušotinu i radijalni protok. Kod ostalih tipova stimuliranih bušotina, poput frakturiranih, pravilo postizanja konstantne derivacije se analogno primjenjuje na interpretaciju pseudo-radijalnog protoka. U tom slučaju se bušotine u programu Saphir analiziraju temeljem efektivnog radijusa bušotine.

Za odabrani test porasta višestruko frakturirane horizontalne bušotine u slabo propusnom ležištu šejla Eagle Ford, autori tvrde da se njihovim simulacijskim modelom ne može pouzdano odrediti dolazi li do područja pseudo-radijalnog protoka ili ne, iako je mjerenje trajalo gotovo punih mjesec dana. Radi toga je novom metodom krivulja ekstrapolirana još dublje u nepoznato područje, odnosno i za period nakon mjesec dana trajanja testa. U daljnjim koracima je pouzdanost ove ekstrapolacije matematički dokazana,

a dio nepoznatog područja krivulje tj. trajanja testa, je prošireno i podijeljeno na dva dijela, prividni i stvarni, kao što je ilustrirano slikom 60.

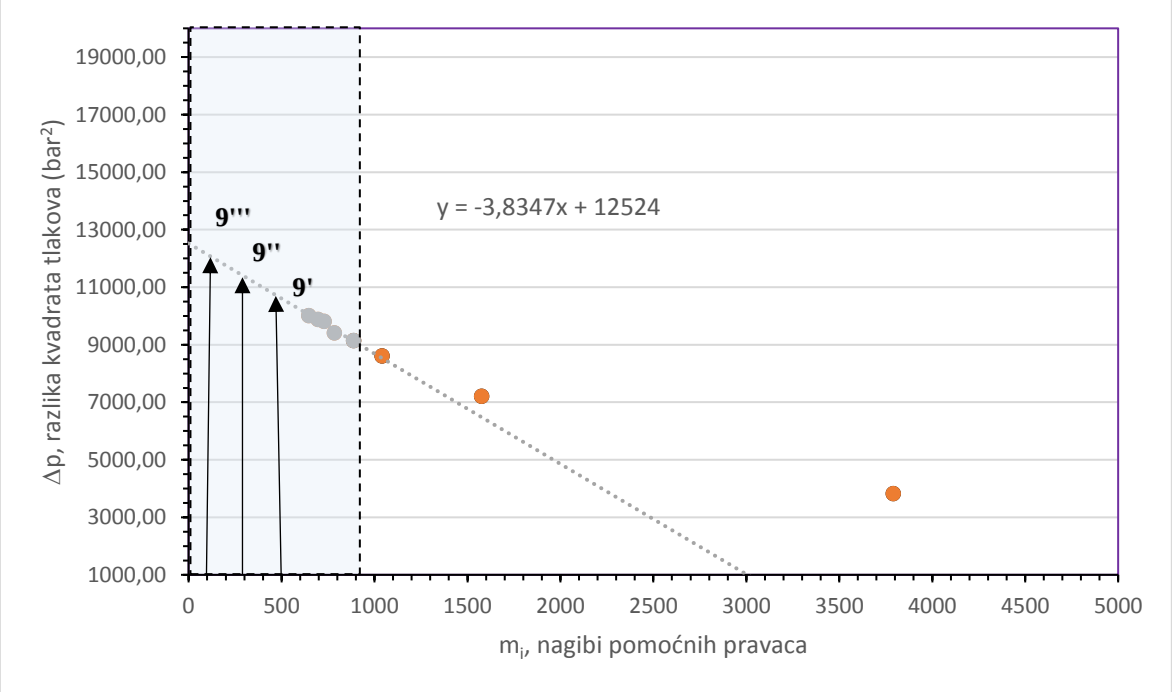
Nastavak procedure za točku A, temelji se na dokazu da se aproksimiranu jednadžbu $y_{i=4-8}$ može uzeti za nadogradnju zakonitosti određivanja nagiba, m_i, u nepoznatom području krivulje porasta tlaka slabo propusnih plinskih ležišta, jer se uz vrlo malo odstupanje, iz njenog odsječka na ordinati može odrediti početni tlak, p_i. Opisana procedura postavljena je za buduću primjenu tako da se tzv. poznato područje odnosi na trajanje testa porasta do točke 2, koje obuhvaća prva četiri retka iz tablice 7 tj. približno prvih 100 sati mjerenja. Prividno, nepoznato područje obuhvaća trajanje testa do točke 3, odnosno točke od 4. do 8. retka iste tablice tj. 643 sata mjerenja, dok se stvarno, nepoznato područje odnosi na trajanje testa od točke 3 do početnog tlaka, p_i. U budućoj primjeni će postojati samo stvarno, nepoznato područje, koje će se protezati od točke 2 skroz do tlaka, p_i, jer će točka 3 biti nepoznata.



Slika 60: Podjela nepoznatog područja trajanja testa porasta tlaka na prividno i stvarno

Iako se do sada smatralo da je nepotrebno raditi analize do krajnje točke stabilizacije tlaka u ležištu, jer se pretpostavlja da bi ono u slabo propusnom ležištu nastupilo nakon vrlo, vrlo dugog perioda od nekoliko godina, u ovoj metodi je isključivo s matematičkog aspekta, to bilo neophodno učiniti. Zato su za određivanje ekstrapoliranih točaka na krivulji porasta tlaka odabrana tri različita vremena, Δt, koja su za sada nepoznata (slika 61). Točke su

nazvane 9', 9'' i 9''', da zbog prethodno korištenih brojki ne bi došlo do nejasnoće u označavanju. Raspoređene su proporcionalno uzduž vrijednosti nagiba, m_i, u iznosima od 500, 300 i 100, u smjeru od poznatog prema nepoznatom području trajanja testa porasta.



Slika 61: Postavljanje točki 9', 9'' i 9''' za ekstrapolaciju na krivulju porasta

S dijagrama na slici 61 je lako očitati ili izračunati razlike kvadrata tlakova, Δp, za odabrane nagibe, m_i, prema jednadžbi:

$$y_{i=4\text{-}8} = -3{,}8347x + 12524 \qquad (4.10)$$

pa treba riješiti problem u kojem vremenu testa porasta tlaka, Δt, dolazi do ovih tlakova. Bez toga ove točke nije moguće ekstrapolirati na krivulju porasta. Ovaj problem je već iznesen u prethodnom koraku, gdje je uočeno da ne postoji matematička ovisnost nagiba, m_i, o vremenu, Δt. S obzirom da su ova oba parametra ovisne varijable o tlaku, matematički bi bilo upitno postavljati njihovu međuovisnost. Stoga je ovaj veliki problem za daljnji razvoj metode riješen grafo-analitičkim putem. Najprije je jednadžba (4.10) napisana u obliku:

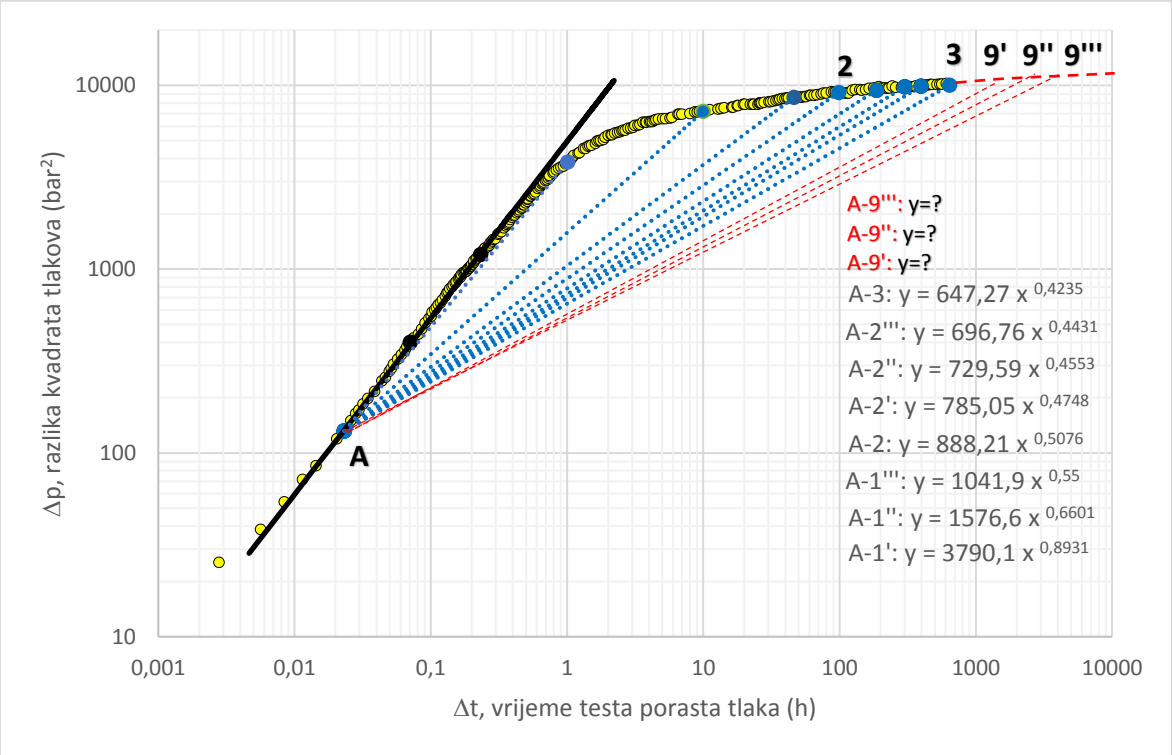
$$\Delta p_{i=4\text{-}8} = -3{,}8347 * m_i + 12524 \qquad (4.11)$$

a zatim su za točke od 9' do 9''' prema jednadžbi (4.11) izračunate razlike kvadrata tlakova, Δp, i unesene u tablicu 13.

Tablica 13: Točke za ekstrapolaciju na krivulji porasta

točke	m_i	Δp (bar^2)
9'	500	10606,65
9''	300	11373,59
9'''	100	12140,53

Nakon toga su ove tri točke samo približno položene na ekstrapoliranu krivulju porasta sa slike 51, koja je preuređena u sliku 62.



Slika 62: Približno postavljene točke za ekstrapolaciju na krivulji porasta

Za svaki novi pravac, počevši s poveznicom (A-9'), može se postaviti sustav dviju jednadžbi s dvije nepoznanice. Time se došlo do rješenja za određivanje vremena, Δt, u kojem krivulja porasta na slici 62 presijeca očitane razlike tlakova, Δp, sa slike 61. Prva se jednadžba prema općem obliku potencije (4.6), postavlja najprije za točku A, a zatim za točku 9' na sljedeći način:

1. $\Delta p_A = m_{9'} * \Delta t_A^{n9'}$

2. $\Delta p_{9'} = m_{9'} * \Delta t_{9'}^{n9'}$

Ovdje je bilo ključno za prepoznati da se isti očitani nagib, $m_{9'}$, za odabranu točku 9' s linearnog (m_i, Δp)-dijagrama (slika 61), može iskoristiti i u sustavu navedenih jednadžbi potencija s log-log dijagrama. Time su kao jedine dvije nepoznanice prethodnog sustava dviju jednadžbi ostali iznos potencije, $n_{9'}$, i traženo vrijeme, $\Delta t_{9'}$. Do njihovih rješenja dolazi se jednostavnim izvodima, koji su izraženi općim oznakama na sljedeći način:

$$n_{9'} = \frac{\log \frac{\Delta p_A}{m_{9'}}}{\log \Delta t_A} \tag{4.12}$$

$$\Delta t_{9'} = \left(\frac{\Delta p_{9'}}{m_{9'}} \right)^{\frac{1}{n_{9'}}} \tag{4.13}$$

Vrijednosti parametara za točku A izneseni su u drugom koraku metode u tablici 6, a parametri za točku 9' su u tablici 13. Kada se one uvrste u izraze (4.12) i (4.13) dobivaju se tražena rješenja:

$$n_{9'} = \frac{\log \frac{131,47}{500}}{\log 0,0232} = 0,3549$$

$$\Delta t_{9'} = \left(\frac{10606,65}{500} \right)^{\frac{1}{0,3549}} = 5465,89h.$$

Usporedbom s približnim položajem točke 9' na slici 62 vidljivo je da rezultat za trajanje testa, $\Delta t_{9'}$, od 5465,9 sati osim što je matematički egzaktan, da je i realan s obzirom na trend stabilizacije krivulje u nepoznatom području porasta tlaka. Na istoj slici 62 se može uočiti da rezultat za iznos potencije, $n_{9'}$, od 0,3549, također prati opadajući trend iznosa potencija u jednadžbama za poveznice točaka od (A-1') do (A-3), gdje mu se vrijednost snižava s 0,8931 na 0,4235.

Procedura opisana za sustav jednadžbi (A-9') je analogno provedena za točke 9'' i 9'''. Svi rezultati traženih vremena točaka za ekstrapolaciju krivulje porasta trebali bi biti prikazani u tablici 14, ali nisu, nego je nastavak dan u tablici 15, što je pojašnjeno u nastavku.

Tablica 14: Rezultati vremena trajanja testa za ekstrapolaciju krivulje porasta

točke	**Δt (h) = Δt (d)**	**Δp** (bar^2)
9'	**5465,9 = 227**	10606,65
9''		11373,59
9'''		12140,53

U budućoj primjeni metode će cijelo nepoznato područje biti stvarno (slika 61), pa će se trebati odabrati još barem nekoliko točaka za ekstrapolaciju, što ovdje nije bilo potrebno. Za njih treba provesti iste procedure izvoda kao i za poveznicu (A-9'), kako bi svaka buduća ekstrapolacija krivulje porasta u konačnici bila što preciznija. Sukladno rezultatu u tablici 14, najprije se smatralo da s odabirom točaka uzduž skale za nagibe, m_i, ne treba ići previše duboko iz smjera poznatog područja u nepoznato, jer se time zadire preduboko u područje trajanja testa od tisuću godina i više! No, u razvoju metode to je ipak bilo nužno, ali isključivo s matematičkog aspekta, jer se do otkrića postoji li uopće u ovom ekstremno slabo propusnom ležištu područje stabilizacije tlaka ili ne, dolazi u sljedećem koraku! Način na koji je to područje definirano matematički, otkriveno je u nastavku, ali odavde proizlazi još jedna prednost odabira upravo ovog testa za razvoj metode. Naime, s obzirom da je izveden za ekstremni slučaj propusnosti ležišta reda veličine u nano Darcyjima, njegova pouzdanost za ležišta kategorizirana kao slaba i vrlo slaba, će biti veća.

Tijekom razvoja ovog koraka metode izneseno je da određivanje trajanja testa porasta u području dosezanja početnog ležišnog tlaka u slabo propusnom ležištu s inženjerskog aspekta nema smisla. Ali, s obzirom da se radi o matematički egzaktnoj proceduri i taj nepoznati vremenski dio je ipak ispitan do kraja, kako bi se utvrdila eventualna mogućnost vrlo kasnog razvijanja pseudo-radijalnog protoka, a sve u svrhu mogućnosti primjene poznatih metoda za određivanje propusnosti stijene. Stoga su svi rezultati prikazani u tablici 15, gdje je trajanje testa, Δt, izraženo u danima i godinama, te je dodana kolona za mjereni tlak, p.

Tablica 15: Rezultati svih vremena za ekstrapolaciju krivulje porasta

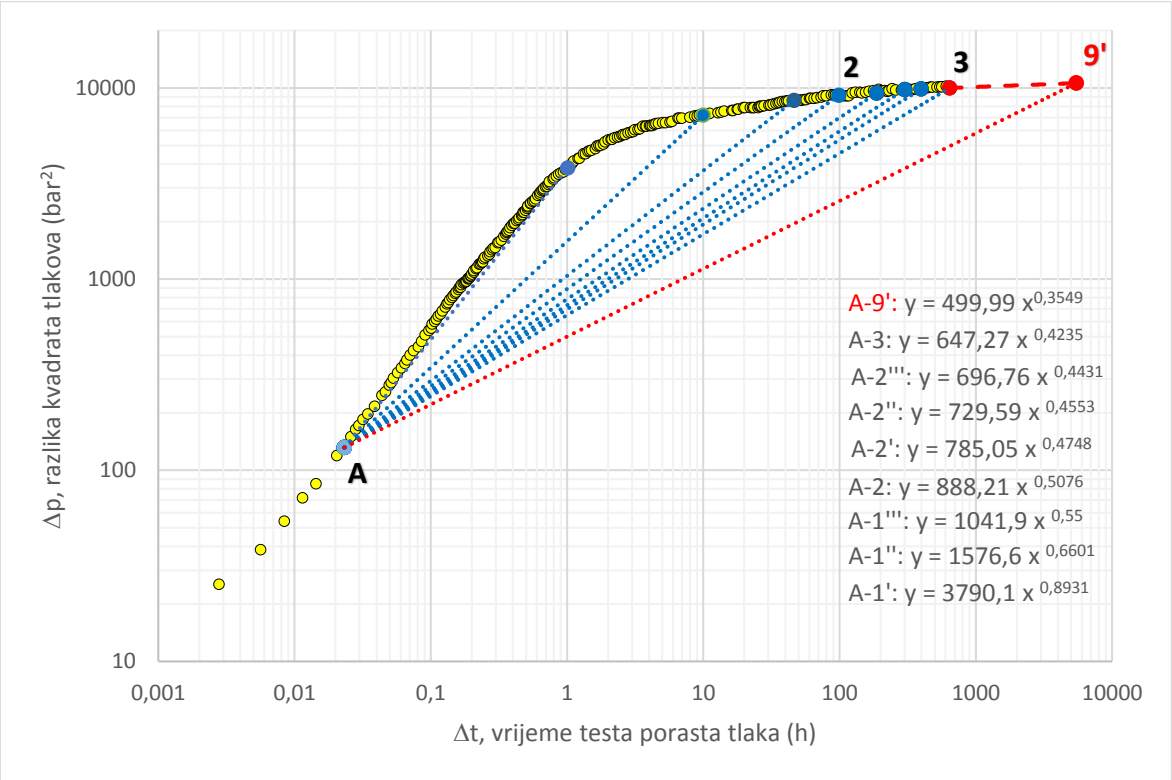
točke	**Δt (h) = Δt (d) = Δt (godine)**	**Δp** (bar^2)	**p** (bar)
9'	5465,9 h = 227 d = 0,62 g	10606,65	106,2
9''	15,9E6 h = 663809,2 d = 1818,6 g	11373,59	109,8
9'''	4,71E28 h = 1,96E27 d = 5,3E24 g	12140,53	113,2

U podacima odabranog testa porasta za razvoj metode već je izneseno da je tlak izmjeren do 27 dana kada je iznosio 103,43 bara (točka 3), te da je početni ležišni tlak 113,8 bar. Kada se to usporedi s vremenima u tablici 15, vidi se da bi u sljedećih 200 dana trajanja testa, tlak porastao za 3 bara na vrijednost 106,2 bara (točka 9'). Za porast od još 3 bara test bi trebao trajati 1818 godina, što je rezultat točke 9"! Do potpunog izjednačavanja tlaka u ležištu došlo bi također u vrlo imaginarnom vremenu, reda veličine od 10^{24} godina. Ovu vrijednost ipak treba uzeti samo kao vjerojatnu, matematičku vrijednost.

Ovdje treba napomenuti da je za sve proračune u metodi bilo moguće koristiti i softiciranije matematičke programe, ali rezultat u konačnici ne bi ovisi o tome, već o uspješnoj realizaciji svih koraka, jer je najteži dio ovog puta bio uspješno razraditi novu metodu do kraja.

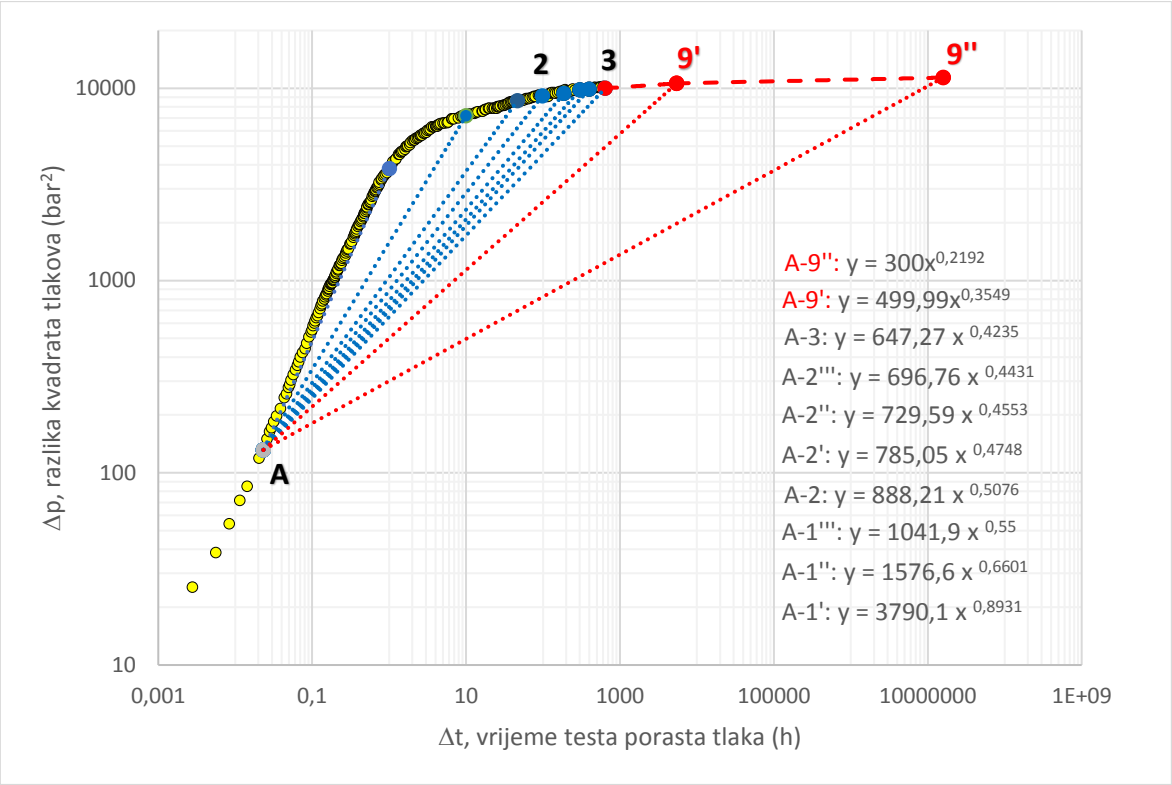
Radi prikaza ekstrapoliranih točaka 9', 9" i 9"' na stvarnim pozicijama krivulje porasta, log-log dijagram sa slike 62 je preuređen i za svaku pojedinu točku prikazan na slikama 63, 64 i 65. Iako se analizom krivulja porasta na posljednje dvije slike zadire u vremenski vrlo imaginarno područje, ovi log-log dijagrami su ipak ispitani, jer se temelje na matematički točno izvedenim poveznicama. Osim znatiželje, njihova svrha je nakon ekstrapolacije cijele krivulje porasta, koja je provedena u sljedećem koraku metode, ispitati i krivulju derivacije u cijelom nepoznatom području.

Točka 9' je rješenjem ekstrapolacije od 227 dana pala u prvi sljedeći logaritamski ciklus nakon točke 3 tj. nakon završetka krivulje porasta, pa se stoga njena pozicija i vrijednost koordinatnih parametara mogu smatrati sasvim realnima u odnosu na preostale dvije točke 9" i 9"'.

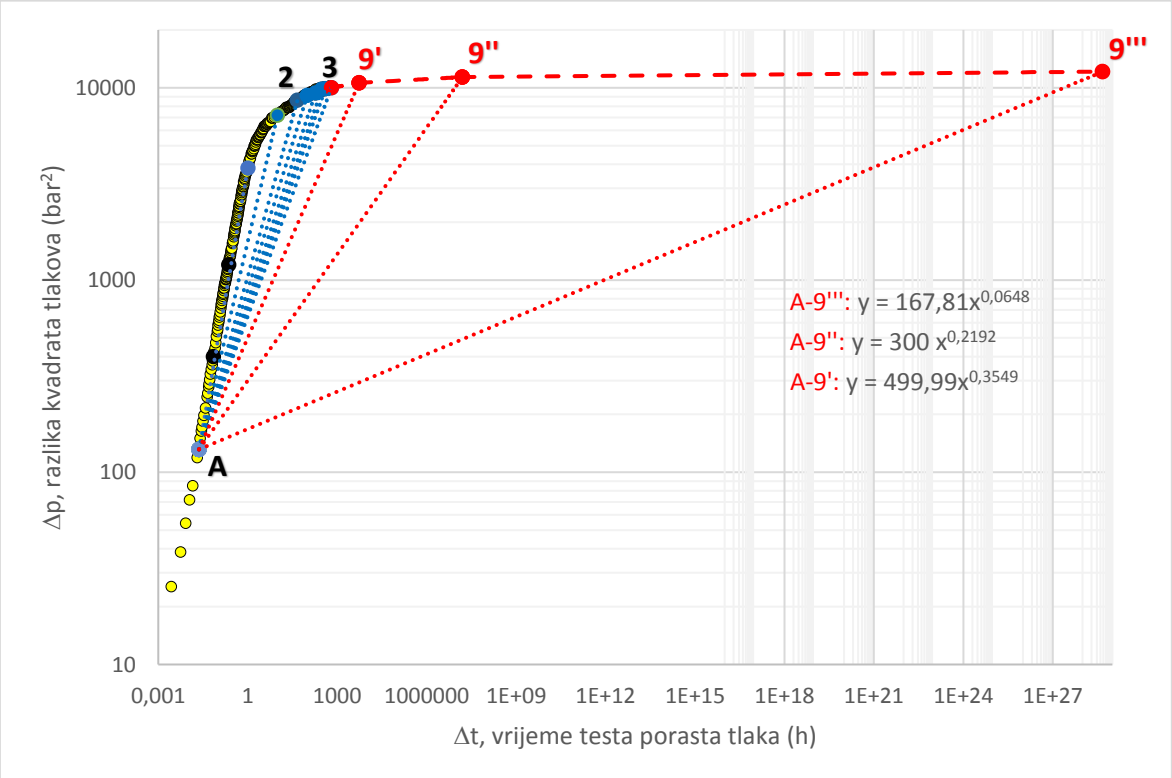


Slika 63: Stvarna pozicija točke 9' za ekstrapolaciju krivulje porasta

Iako je u imaginarnom području od 1818 godina, točka 9" je ipak rezultat egzaktnih matematičkih izvoda. Ona je smještena za još dva logaritamska ciklusa dublje prema nepoznatom području krivulje porasta u odnosu na točku 9'. Njenu matematičku potvrdu može se iščitati i iz kontinuiranog opadanja nagiba, $m_{9''}$, i potencije, $n_{9''}$, u jednadžbi (A-9") sa slike 64. Naime, ova jednadžba je u Excelu dobivena provjerom u log-log dijagramu, jer je najprije izračunata temeljem opisane procedure za točku 9' i linearnog dijagrama sa slike 61, a zatim je kao ekstrapolirana točka ponovno vraćena na log-log dijagram radi provjere točnosti. Isto je napravljeno i za točku 9''', ali njen nagib, $m_{9'''}$, zbog izrazito imaginarnog vremenskog iznosa, ima malo odstupanje i umjesto iznosa 100, kod provjere se dobiva vrijednost 167, kao što se vidi na slici 65. No, ako se uzmu u obzir ove ekstremne vrijednosti, ipak se može zaključiti da je ovo odstupanje nije značajno.



Slika 64: Stvarna pozicija točke 9" za ekstrapolaciju krivulje porasta



Slika 65: Stvarna pozicija točke 9''' za ekstrapolaciju krivulje porasta

4.3.5. Međukorak – pomoćni (X, Δp)- dijagram za ekstrapolaciju krivulje

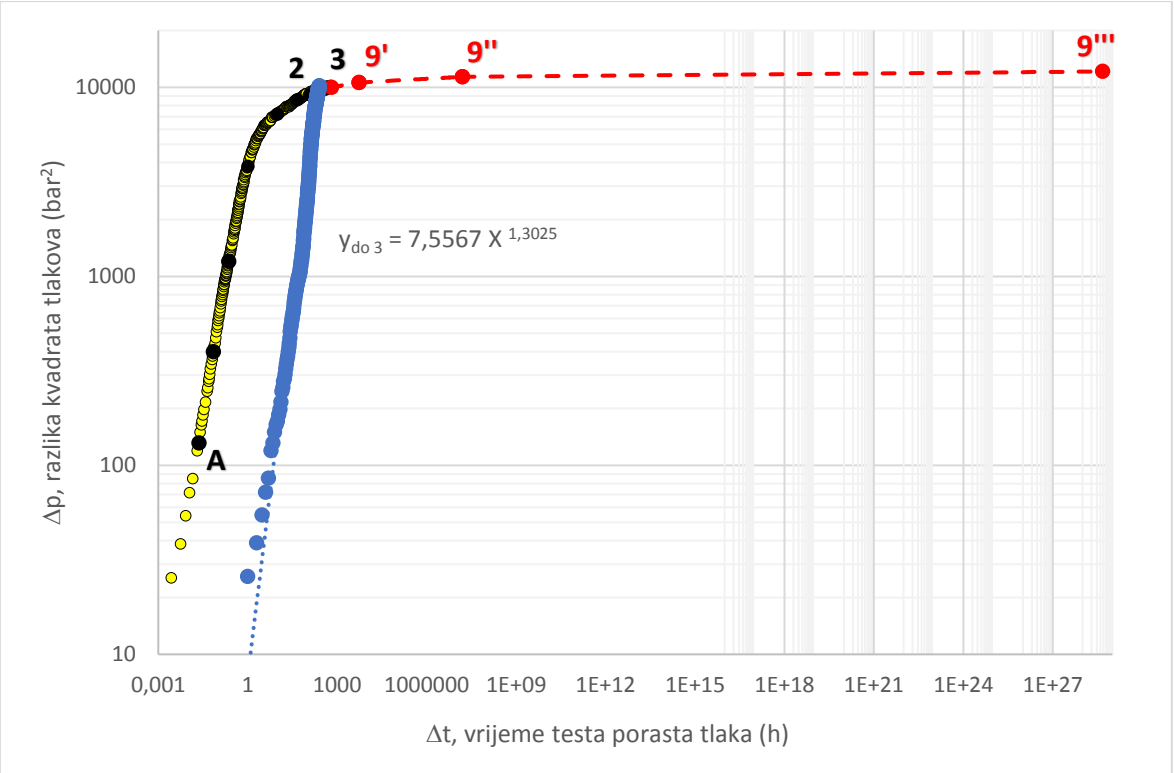
Polu-logaritamski dijagram kojim se definira ovisnost između parametra rednog broja mjerenja tj. broja retka točke mjerenja, X, unutar testa porasta tlaka prikazanog u tablici 16 (prilog 1), i parametra razlike kvadrata tlakova, Δp, nazvan je pomoćnim, jer se ovaj korak ne koristi u primjeni metode. On je dio faze istraživanja u kojoj se još nije znalo kako uspješno doći do cilja metode, što znači da se ovim dijagramom tj. ovim korakom metode nije došlo do željene ekstrapolacije krivulje porasta, nego je pozitivno rješenje nađeno i prikazano tek u sljedećem koraku. Međutim, razlog iz kojeg ovaj korak ipak nije izostavljen u opisu, je njegovo objavljivanje, jer će možda potencijalnom čitaocu upravo ovaj uvid dati neke nove ideje u sličnim istraživanjima. Isto tako, prikazan je i iz razloga što put razvoja gotove metode, koja se ovdje opisuje, može izgledati puno jednostavniji nego što je uistinu bio.

S obzirom da je tablica 16 samo dio testa prikazanog u cijelosti u prilogu 1, ovdje se vidi na koje vrijednosti tj. na koje točke se odnosi prvi, sedmi i posljednji, odnosno 254. redak.

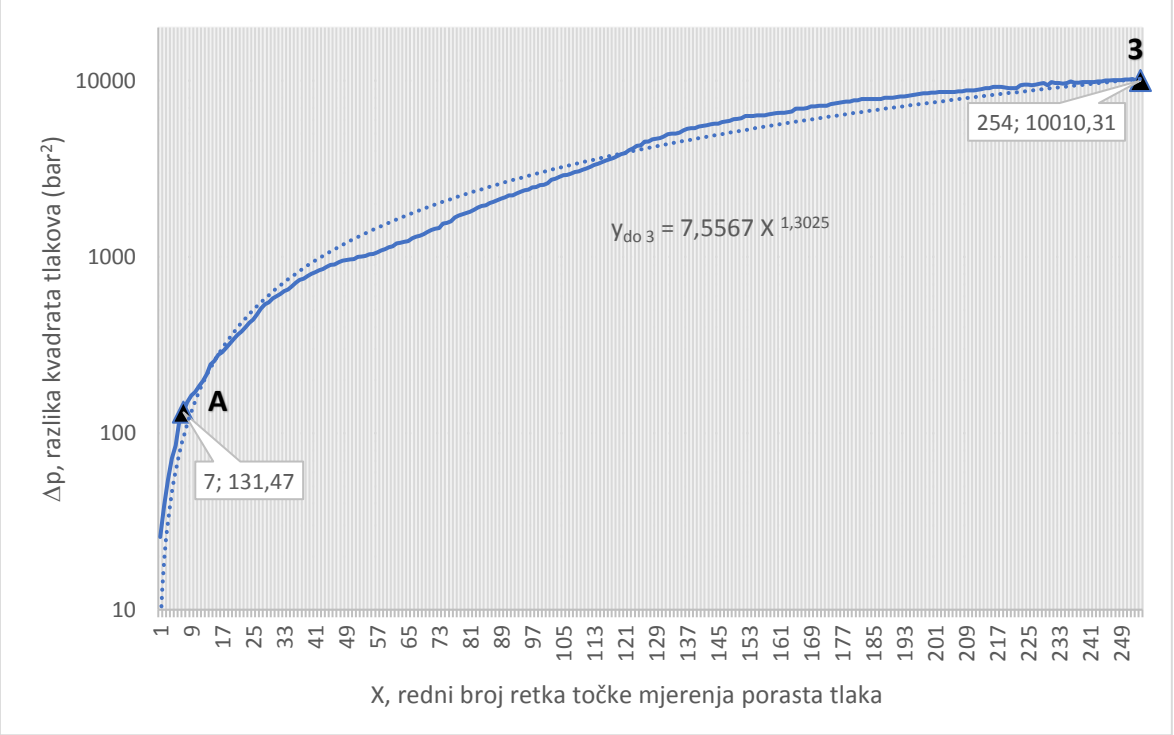
Tablica 16: Trajanje testa, Δt, i pridruženi parametar, X, za broj retka točke mjerenja testa

X (br. retka)	**Δt (h)**	**Δp (bar^2)**	**točke**
1.	0,0028	25,83	1
.	.	.	.
7.	0,0232	131,47	A
.	.	.	.
254.	643	10010,31	3

Dakle, ako se u prethodni log-log dijagram sa slike 65 unese krivulja označena plavom bojom na slici 66, a to je ovisnost broja retka mjerenja, X, u iznosu od 1 do 254, u odnosu na razliku kvadrata tlakova, Δp, može se dobiti njihova jednadžba $y_{do\ 3}$. Ona prvim uvidom ne daje puno mogućnosti, ali se istraživanjem pokazalo da bi se prikazom ove plave krivulje u polu-logaritamskom sustavu na slici 67 moglo doći do jedinstvene jednadžbe za ekstrapolaciju krivulje porasta u cijelom nepoznatom području krivulje samo s jednim izrazom, koji ne bi imao velika odstupanja. Nažalost, u tu jednadžbu je neminovno bilo istodobno uključiti i ovisnost trajanja testa, Δt, o broju retka, X, kako bi se ekstrapolirane točke mogle položiti uzduž krivulje porasta, ali u tome se nije uspjelo, već je taj problem riješen na drugačiji način u sljedećem koraku metode.



Slika 66: Trajanje testa, *Δt*, i pomoćni parametar, *X*, za broj retka mjerenja testa porasta



Slika 67: Pomoćni (*X*, *Δp*) polu-logaritamski dijagram

Na slici 67 je vidljivo kako se prvotna uska, plava krivulja sa slike 66 može razvući temeljem iste jednadžbe $y_{do\ 3,}$ ako se parametar na apscisi promjeni iz, *Δt*, u, *X*, i ako se log-log dijagram prebaci u polu-logaritamski sustav. Bez obzira što se njihova matematička međuovisnost nije postigla na adekvatno jednostavan način za buduću primjenu, svakom poznavaocu testova porasta tlaka ne može ne zapeti za oko da ovaj oblik krivulje u polu-logaritamskom sustavu izuzetno podsjeća na oblik krivulju porasta, pa je stoga ovdje i malo studioznije analiziran.

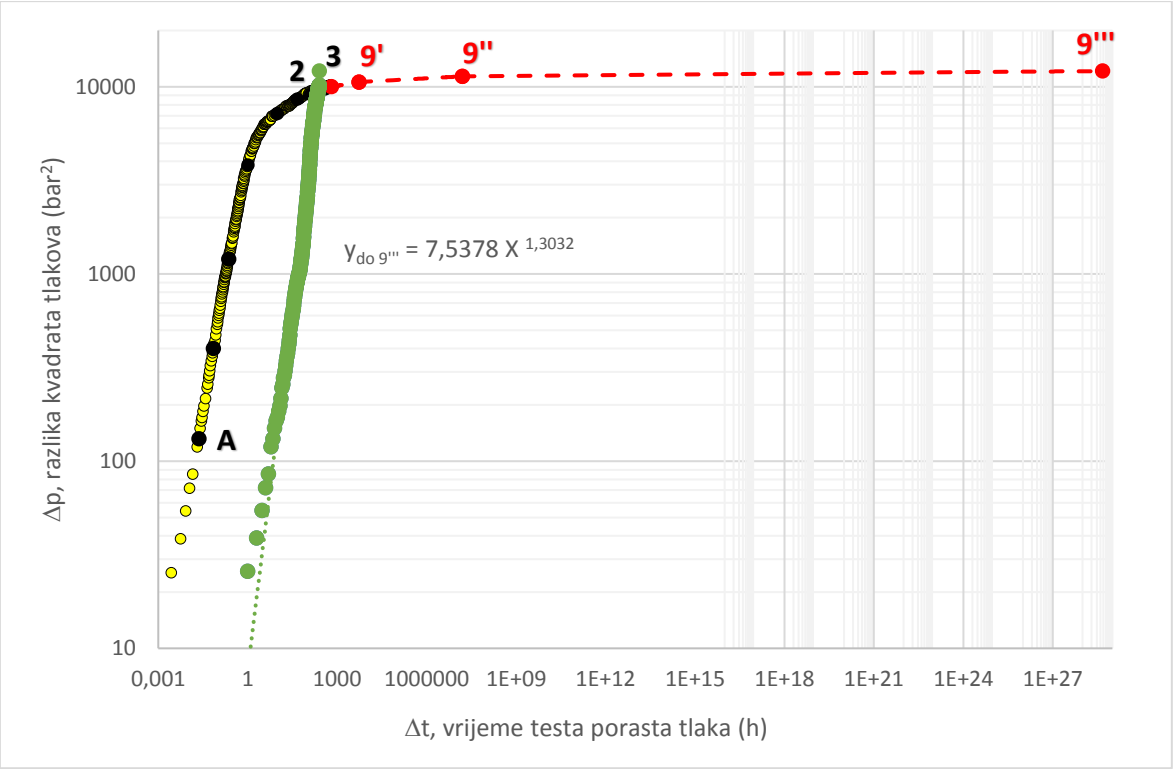
Iz tog razloga je na sljedećoj slici 68 prvi cilj bio pronaći matematički način povezivanja parametara, *Δt*, i, *X*, tako što je plava krivulja sa slike 67 produljena u zelenu i to samo za jedan dodatni redak, do točke 9''', prema tablici 17.

Tablica 17: Trajanje testa, *Δt*, i pridruženi parametar, *X*, do ekstrapolirane točke mjerenja 9'''

X (br. retka)	Δt (h)	Δp (bar^2)	točke
1.	2,8E-3	25,83	1
.	.	.	.
7.	2,32E-2	131,47	A
.	.	.	.
254.	6,43E+2	10010,31	3
255.	4,71E+28	12140,53	9'''

Time je na slici 68 dobivena analogna jednadžba $y_{do\ 9'''}$ s kojom nije pronađen put ekstrapolacije krivulje porasta od točke 3 do 9''', temeljem poznate $y_{do\ 3}$, kao što se sličnim postupkom uspjelo odgonetnuti novu metodu za određivanje početnog ležišnog tlaka, p_i, u 3. koraku metode.

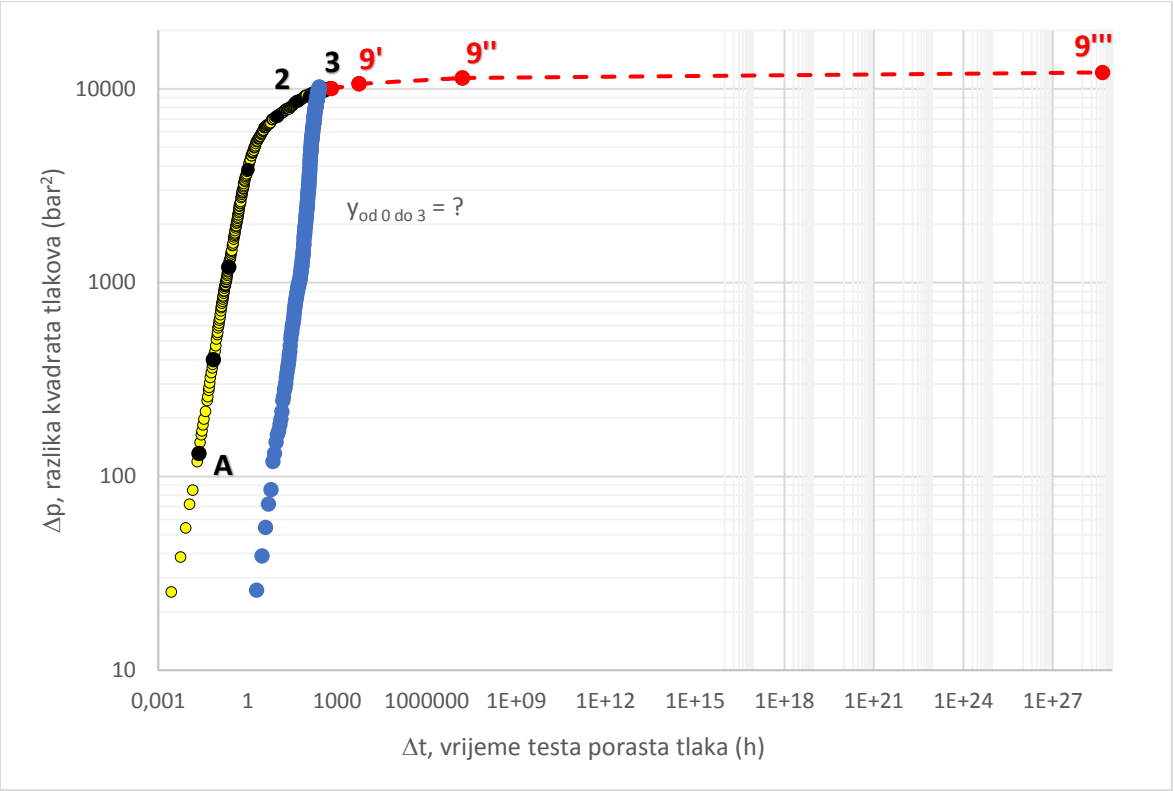
Međutim, u nastavku je probana još jedna tzv. matematička zamka, a to je postavljanje nove nul-točke u sam test porasta, kao što je pokazano tablicom 18. Poznato je da umetanje nul-točke u ovakve oblike dijagrama može dovesti do novih poveznica, a s obzirom da je u nultom vremenu u bušotini vladao poznati dinamički tlak, koji se u nultom vremenu istovremeno smatra i statičkim, prema jednadžbi (4.2), razlika kvadrata tlakova iznosi također nula. No, daljnjom analizom i postavljanjem istih odnosa kao na prethodnim slikama, u dijagramu na slici 69 se nije uspjelo doći do novog rješenja za jednadžbu y_{od0do3}. Bez obzira na to, s ovim analiziranjem se nastavilo, pa je u novi log-log dijagram na slici 70 postavljena i ovisnost između, *X*, i, *Δt*, te se do odgovarajuće jednadžbe također nije došlo.



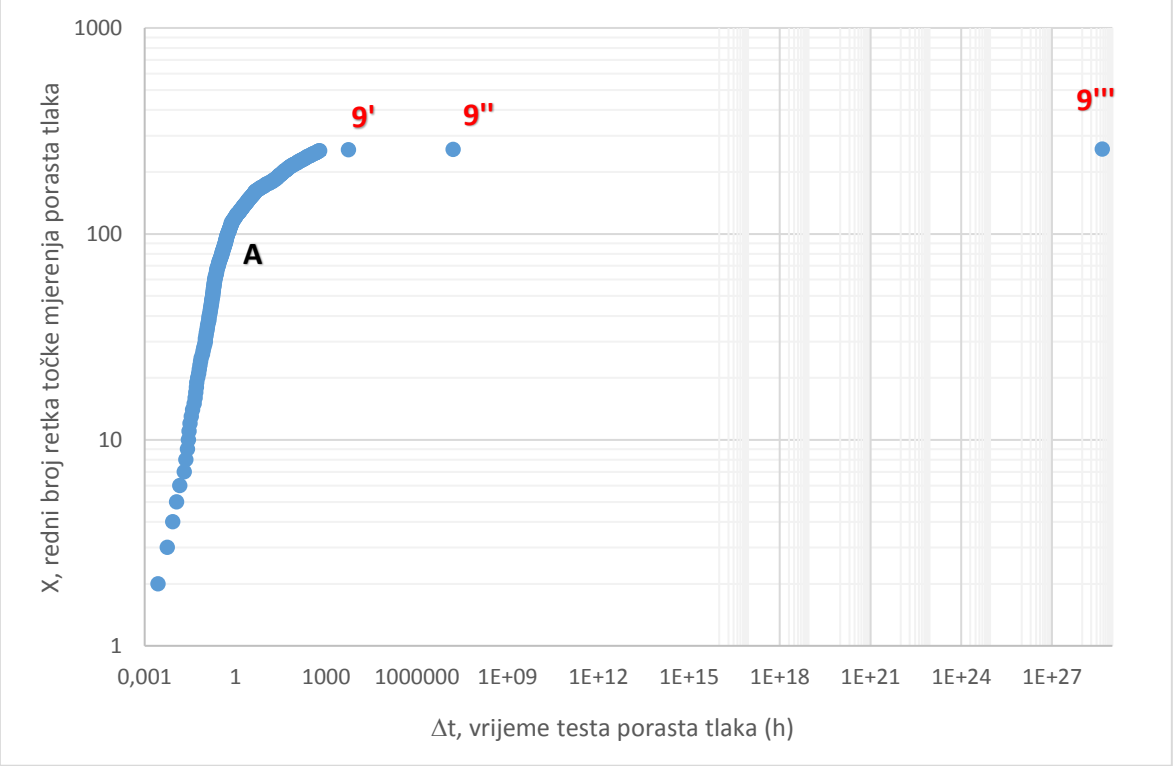
Slika 68: Trajanje testa, *Δt*, i parametar broja retka, *X*, do ekstrapolirane točke mjerenja 9'''

Tablica 18: Trajanje testa, *Δt*, i pridruženi parametar, *X*, za dodanu nultu točku mjerenja

X (br. retka)	Δt (h)	Δp (bar²)	točke
1.	0	0	0
2.	0,0028	25,83	1
.	.	.	.
8.	0,0232	131,47	A
.	.	.	.
255.	643	10010,31	3



Slika 69: Trajanje testa, *Δt*, i broj retka testa, *X*, za slučaj dodane nulte točke mjerenja

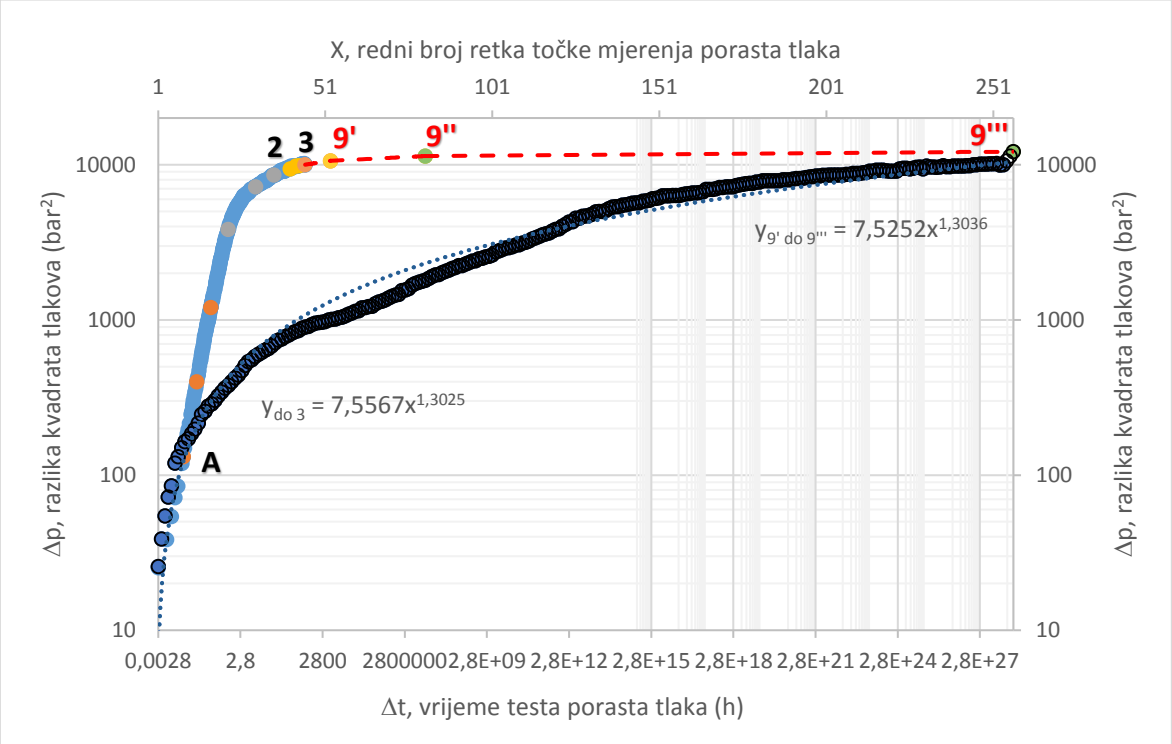


Slika 70: Pomoćni (*X*, *Δt*) log-log dijagram

Kako bi se ipak na neki način nepoznato područje krivulje porasta proširilo, s analizom se vratilo na polu-logaritamski sustav sa slike 67, te je prema tablici 19 konstruiran posljednji dijagram iz međufaze istraživanja, prikazan na slici 71. Iz tablice 19 je izbačena nul-točka, a na kraju su dodani redci za sve tri ekstrapolirane točke.

Tablica 19: Trajanje testa, *Δt*, i parametar, *X*, bez nulte točke do svih ekstrapoliranih točaka

X (br. retka)	Δt (h)	Δp (bar^2)	točke
1.	2,8E-3	25,83	1
.	.	.	.
7.	2,32E-2	131,47	A
.	.	.	.
254.	6,43E+2	10010,31	3
255.	5,46E+3	10606,65	9'
256.	1,59E+7	11373,59	9''
257.	4,71E+28	12140,53	9'''



Slika 71: Pomoćni (*X*, *Δp*) i (*Δt*, *Δp*) polu-log dijagrami za ekstrapolaciju krivulje porasta

Iz ovog paralelnog prikaza polu-logaritamskih dijagrama za obje ordinate parametara, *X*, i *Δt*, u ovisnosti o, *Δp*, se uočava da se postavljanjem jednadžbi $y_{do\ 3}$ i $y_{9'\ o\ 9'''}$ i njihovim daljnjim modeliranjem nije uspjelo doći do željenog cilja, a to je dobivanje pomoćnog izraza za ekstrapolaciju krivulje testa porasta u nepoznato područje, temeljem podataka za poznati dio krivulje. Kao što je izneseno, s novim pristupom u sljedećem koraku je problem riješen, a ovaj međukorak u razvoju metode ipak je iznesen kao dio ovog istraživanja.

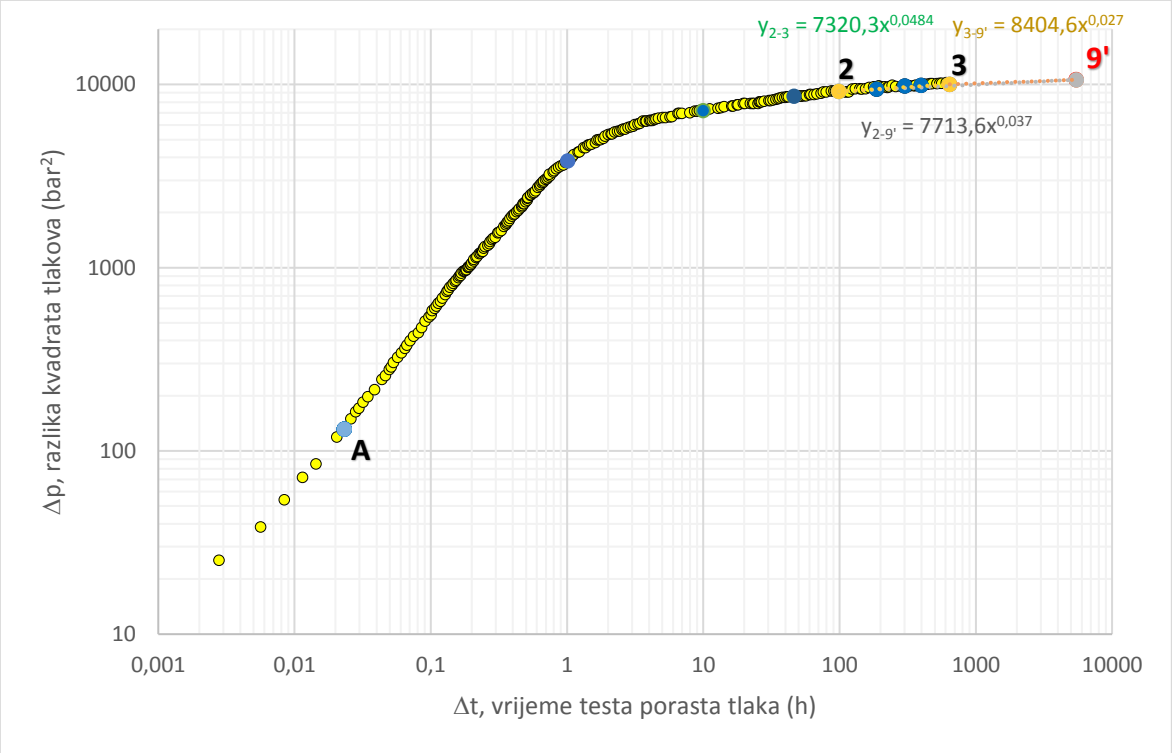
4.3.6. Peti korak – optimiranje ekstrapoliranih segmenata krivulje porasta

U ovom koraku je matematički definirana cjelokupna krivulja porasta tlaka do posljednje ekstrapolirane točke 9''' tj. do kraja stvarnog, nepoznatog područja krivulje, a ne samo do svršetka tzv. prividnog, nepoznatog područja. Upravo iz razloga što se nije znalo u kojem bi dijelu krivulje porasta moglo doći do pseudo-radijalnog oblika protoka, uvidjelo se da je krivulju optimalno ekstrapolirati segment po segment. Stoga je najprije detaljno opisana optimizacija ekstrapolirane krivulje porasta do točke 9', a zatim je analogna procedura provedena za nastavak ekstrapolacije do točke 9'' i onda sasvim do kraja nepoznatog područja i točke 9'''.

4.3.6.a Ekstrapolacija krivulje testa porasta do točke 9'

Na slici 72 je segment po segment prikazan odabir ekstrapolacije krivulje porasta od zadnje poznate točke 3 do prve ekstrapolirane točke 9' u nepoznatom području krivulje, gdje je potrebno istražiti dolazi li do oblika pseudo-radijalnog protoka. Za razliku od pristupa iznesenog u prethodnom međukoraku, ovdje je za aproksimaciju tijeka porasta krivulje ponovno odabrana jednadžba potencije iz već opisanih prednosti. To su prvenstveno njena točnost i pristupačnost korištenja putem programa Excel. Na log-log dijagramu sa slike 72 su, radi orijentacije i poveznice s prethodnim koracima metode, ostavljene pozicije točke A i ostalih pomoćnih točaka, koje se ovdje više ne koriste. Vidljivo je i da su na krivulji postavljene tri nove jednadžbe potencije. Prva je za poznati segment od točke 2 do točke 3 (y_{2-3}), a označena je zelenom bojom. Jednadžba se postavlja i za ovaj tzv. poznati segment također iz već iznesenog razloga, kako bi se ovu metodu moglo primijeniti kao jedinstvenu u kratkim testovima porasta slabo propusnih ležišta, mjerenim samo tijekom četiri dana. Druga jednadžba na dijagramu je ispisana svijetlo smeđom bojom ($y_{3-9'}$). Ona pokriva sljedeći segment trajanja testa od točke 3 do 9', odnosno period prividno, nepoznatog

područja do 227 dana nakon zatvaranja bušotine za mjerenje. Postavljanjem sljedeće jednadžbe koja aproksimira oba analizirana segmenta od točke 2 do 9' istraživalo se može li se jedinstvenim izrazom ($y_{2\text{-}9'}$) postići dovoljna točnost ekstrapolirane krivulje. Zna se da u inženjerskoj praksi optimalna ekstrapolacija pojedinih segmenata ne podrazumijeva samo točnost nego i što manji broj koraka za provođenje metode. Iz tog razloga se nije išlo niti u suprotnom smjeru tj. u povećanje broja ekstrapoliranih segmenata radi povećanja točnosti pojedinih aproksimacija. Konačni odabir jednadžbi za ekstrapolaciju u budućoj optimalnoj primjeni za određivanje cjelokupne krivulje do točke 9' slijedi iz analize točnosti svih aproksimacija, prikazanih u tablici 20.



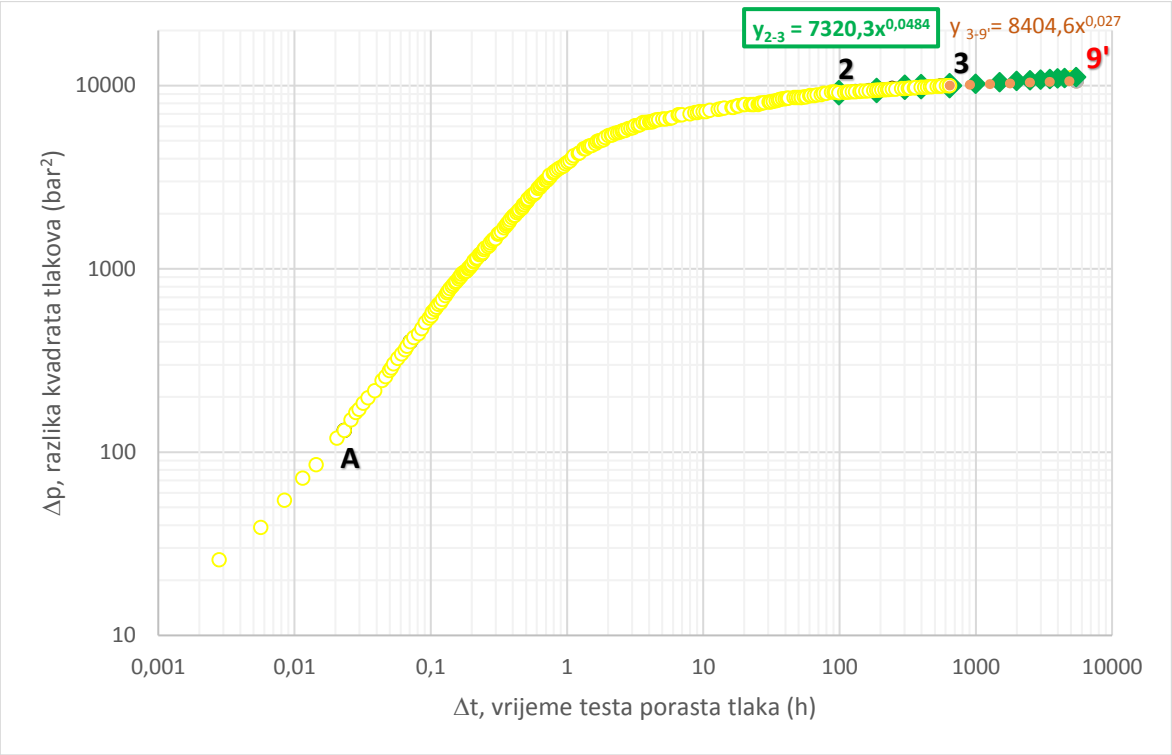
Slika 72: Segmenti trajanja testa za ekstrapolaciju krivulje porasta tlaka do točke 9'

Tablica 20: Odabir optimalne aproksimacije pojedinog segmenta do točke krivulje 9'

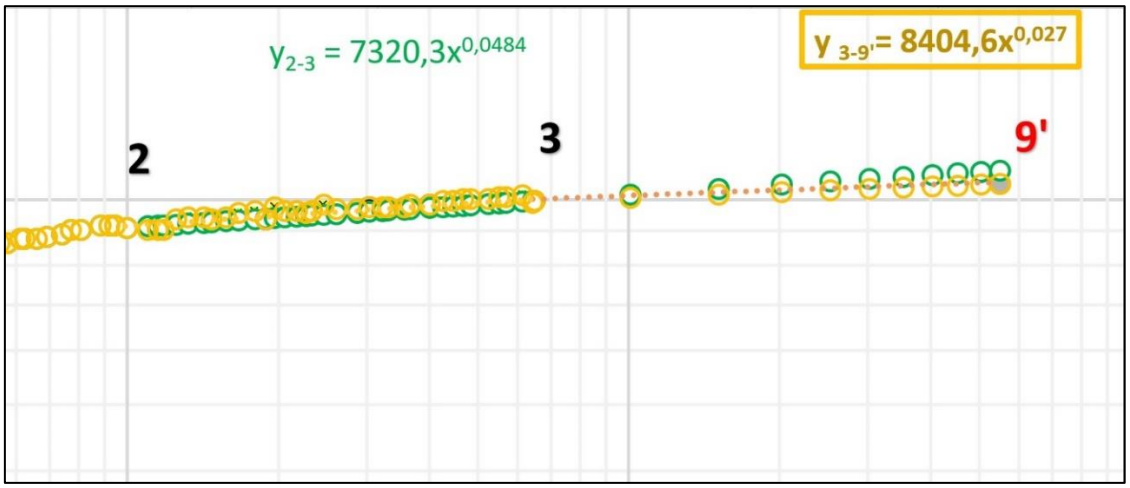
segmenti trajanja (2-9')	područja krivulje (2-9')	jednadžbe za aproksimaciju	primjene za područja:	2-3	2-9'	2-9''	2-9'''
1. segment =	od točke 2 do 3	$y_{2\text{-}3} = 7320{,}3x^{0{,}0484}$	→	✓	✓	-	-
				2-3	**3-9'**	**2-9''**	**2-9'''**
2. segment =	od točke 3 do 9'	$y_{3\text{-}9'} = 8404{,}6x^{0{,}027}$	→	✓	✓	-	-
				2-3	**2-9'**	**2-9''**	**2-9'''**
1. i 2. zajedno =	od točke 2 do 9'	$y_{2\text{-}9'} = 7713{,}6x^{0{,}037}$	→	-	✓	-	-

U prvom i drugom stupcu tablice 20 su istaknuti brojevi segmenata i područja krivulje porasta od točke 2 do 9' koja pokrivaju. U trećem stupcu su jednadžbe za aproksimaciju svakog segmenta, a zatim je analizirano može li se pojedina jednadžba primijeniti i na ostale segmente. Stoga su u posljednja četiri stupca istaknuta područja svih segmenata cjelokupne krivulje testa porasta, počevši s 1. i 2. segmentom, a zatim su dodani i segmenti od točke 2 do 9" i od 2 do 9'". Primjetno je da se u posljednje dvije kolone nije postigla adekvatna aproksimacija cjelokupne krivulje s prve tri jednadžbe. Stoga su u nastavku ponovljene analogne procedure za optimalnu ekstrapolaciju cijele krivulje, najprije do točke 9", a zatim do 9'", ali s novim jednadžbama. Cilj ovog koraka metode je što točnija ukupna aproksimacija sa što manje segmenata, radi jednostavnije provedbe na budućim testovima porasta tlaka.

Iz prvog retka tablice 20 slijedi da se jednadžbom (y_{2-3}) može aproksimirati i sljedeći segment tj. krivulju od točke 3 do 9', dok za nastavak aproksimacije do preostalih segmenata odvojenih ekstrapoliranim točkama 9" i 9'" ona ne bi bila prihvatljiva. Međutim, iz slike 73 i proračuna koji ovdje nisu prikazani, već su samo tabelarno izneseni njihovi zaključci, slijedi točniji odabir jednadžbe po segmentu. Na tom dijagramu je zelenom bojom ucrtana ekstrapolacija krivulje po jednadžbi (y_{2-3}), ali na prvi pogled ne bi bilo vidljivo njeno neznatno odstupanje pri kraju 2. segmenta, koje je jasnije prikazano na uvećanom dijagramu na slici 74. Stoga je zaključeno da je i dio krivulje testa porasta od točki 2 do 9' ipak optimalno aproksimirati segment po segment. Zato je u tablici 20 osim kvačice, koja označava dovoljnu prihvatljivost određene aproksimacije na pojedinom području, segment odabrane jednadžbe dodatno označen zatamnjenjem tog polja. U skladu s time je na slici 73 za područje od točki 2 do 3 zaokružena jednadžba (y_{2-3}), a na slici 74 je za segment od točke 3 do 9' zaokružena jednadžba ($y_{3-9'}$). Optimalnost primjene ove jednadžbe na ostale segmente analizirana je u drugom retku tablice 20. Vidljivo je da ju se može primijeniti i na prethodni segment od točki 2 do 3. To polje nije zatamnjeno iz istog objašnjenja kao i u prethodnom slučaju, jer se nešto bolja prihvatljivost u tom području logički postiže već odabranom jednadžbom (y_{2-3}). Nadalje je jasno da se niti jednadžba ($y_{3-9'}$) ne može s dovoljnom točnošću primijeniti na segmente nepoznatog područja do točki 9" i 9'".



Slika 73: Optimiranje ekstrapolacije krivulje porasta do točke 9'



Slika 74: Usporedba točnosti aproksimacija krivulje porasta za segmente trajanja do 9'

U posljednjem stupcu tablice 21 skraćeno je prikazana cjelovita krivulja testa porasta do točke 9', kako bi se u daljnjoj nadogradnji metode iz razlike kvadrata tlakova, Δp, mogao izraziti i tlak mjerenja, p. Ove vrijednosti su neophodne, radi primjene poznatih metoda za određivanje propusnosti stijene, kao i za unos u program Saphir. Osim toga, tabelarni prikaz ekstrapolirane krivulje je najprije nužan u istraživanju oblika i nagiba krivulje derivacije u nepoznatom području krivulje testa porasta, što je provedeno sljedećem koraku metode.

S obzirom da je tablica sa svim originalnim podacima mjerenja do točke 3 već dana u prilogu 1, podaci u tablici 21 su nadograđeni za ekstrapolaciju do točke 9'. U periodu od točke 2 do točke 3 je izdvojeno samo nekoliko redaka, kako bi se mogao umetnuti stupac za provjeru točnosti, odnosno za odstupanja izračunatih kvadrata tlakova, Δp, po aproksimiranoj jednadžbi ($y_{2\text{-}3}$), u odnosu na mjerene vrijednosti iz trećeg stupca tablice. Kao što je vidljivo, odstupanja su minimalna, u iznosima manjim od 1%, što još jednom potvrđuje vrlo visoku pouzdanost u odabiru jednadžbe potencije, kod ovakve vrste primijenjene matematike u novim istraživanjima ležišnog i proizvodnog inženjerstva.

Za postavljanje krivulje u periodu od točke 3 do 9', u tablici su dodane točke od D1 do D9 na proizvoljno odabranim vrijednostima trajanja testa, Δt, počevši s 1E+3 sati do 5E+3 sati. Nakon toga slijedi ekstrapolirana točka 9', za koju je u 4. koraku metode matematički dokazano da bi bila pozicionirana na 5,46E+3 sati, te da bi razlika kvadrata tlakova u tom trenutku porasla na 10606,65 bar^2. Iz tog razloga je odstupanje jednadžbe ($y_{3\text{-}9'}$) u odnosu na ekstrapoliranu krivulju u ovom dijelu nepoznatog područja testa porasta moguće odrediti jedino za točku 9', koje iznosi samo 0,03%. Stoga se cjelovitu krivulju iz posljednjeg stupca tablice 21 može uzeti dovoljno pouzdanom za daljnje analize testa porasta tlaka i nadogradnju metode. Zatamnjena polja u tablici se odnose na optimalno aproksimirane i ekstrapolirane dijelove krivulje porasta.

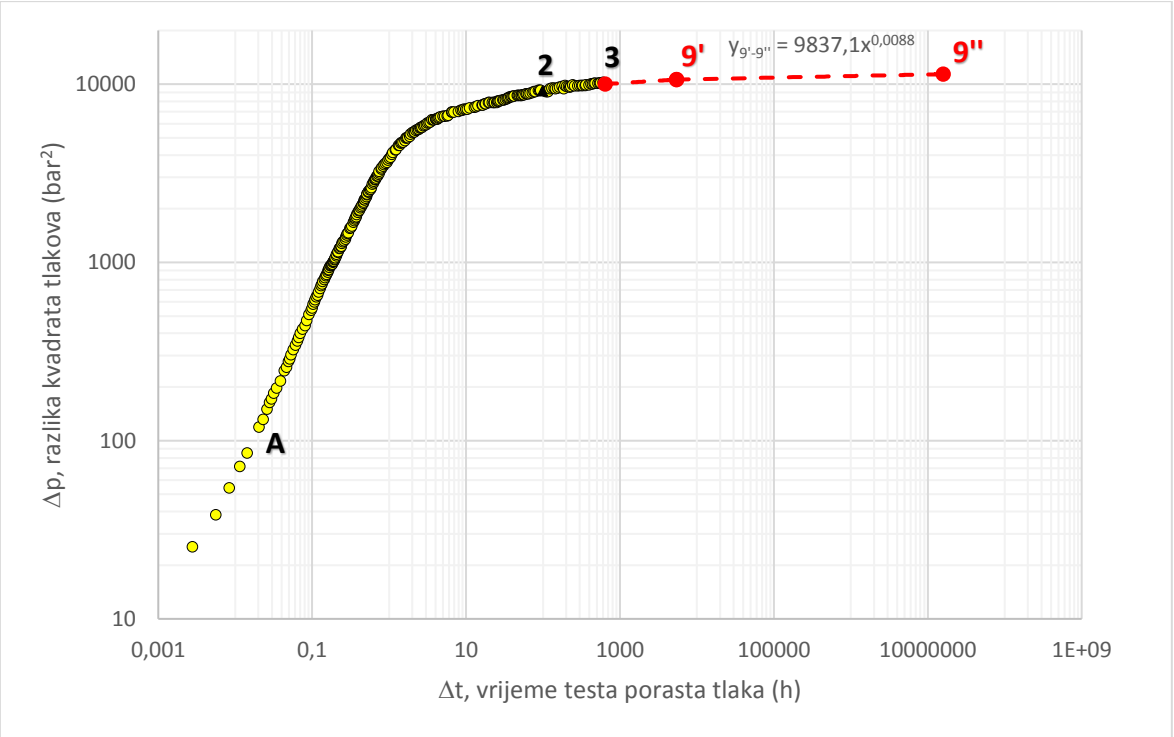
Tablica 21: Podaci za cjelovitu ekstrapoliranu krivulju testa porasta do točke 9'

točke	Δt (h)	Δp (bar^2)	$y_{2\text{-}3}$ (bar^2)	$y_{2\text{-}3}$/Δp(%)	$y_{3\text{-}9'}$ (bar^2)	$y_{3\text{-}9'}$/Δp(%)	Δp (bar^2)
1	0,0028	25,83					25,83
A	0,0232	131,47					131,47
2	98,8	9142,75	9142,714	0			9142,75
	109	9076,01	9186,294	1,2			9186,29
	638	9943,57	10006,5	0,63			10006,5
3	643	10010,31	10010,28	0	10010,28	0	10010,28
D1	1000				10127,85		10127,85
D2	1500				10239,33		10239,33
D3	2000				10319,17		10319,17
D4	2500				10381,53		10381,53
D5	3000				10432,76		10432,76
D6	3500				10476,27		10476,27
D7	4000				10514,11		10514,11
D8	4500				10547,60		10547,60
D9	5000				10577,65		10577,65
9'	5465,9	10606,65			10603,13	0,03	10603,13

4.3.6.b Ekstrapolacija krivulje testa porasta do točke 9"

Na dijagramu sa slike 75 se najprije istraživalo može li se jednadžbom za segment trajanja testa u duboko nepoznatom području, od točki 9' do 9" ($y_{9'-9"}$) aproksimirati i već optimirani dio krivulje u početnom nepoznatom području, od točki 3 do 9'. Na taj način bi se procedura skratila, jer bi se ove dvije ekstrapolacije objedinile jednim zajedničkim izrazom. Iz tog razloga je cijela linija na dijagramu označena crvenom crtkanom bojom. Međutim, već u tablici 20 se pokazalo kao pravilo da se ekstrapolacija jednadžbe određenog segmenta ne može primijeniti na prethodni segment krivulje, s dovoljnom točnošću. To je u skladu s vrlo, vrlo blagim nagibom krivulje porasta na početku nepoznatog područja, karakterističnim za ekstremno slabo propusna ležišta plina, ali i nafte. Naime, kako jednadžba potencije u log-log dijagramu ima oblik pravca, ovaj vrlo blagi porast krivulje tlaka je neophodno aproksimirati segment po segment, upravo radi povijanja krivulje u prvom dijelu nepoznatog područja.

S obzirom da se očekuje da će se daljnji tijek porasta tlaka ipak odvijati po pravcu, jer bi stvarna krivulja u tako dugom trajanju faze stabilizacije tlaka u ležištu imala gotovo zanemarivo povijanje, cjelovita krivulja od točki 9' do 9" aproksimirana je jednim izrazom ($y_{9'-9"}$). U tablici 22 su analogno kao i u prethodnoj tablici najprije unesene proizvoljne vrijednosti za trajanje testa nakon točke 9', počevši s točkom D10 od 1E+4 sati do točke D14 na 1E+6 sati. Nakon toga slijedi točka 9", pozicionirana na 1,59E+7 sati, za koju je također matematički dokazano da bi ordinata iznosila 11373,59 bar^2. Osim toga, u tablici 22 su prikazana i odstupanja aproksimacije za ekstrapolirane točke, te je u krajnjem stupcu nadograđena krivulja porasta do točke 9" za daljnji razvoj metode. Ona se može smatrati optimalnom, jer osim što ekstrapolirane točke imaju zanemariva odstupanja do 2%, njena procjena je dobivena temeljem minimalno dovoljnih razvojnih koraka.

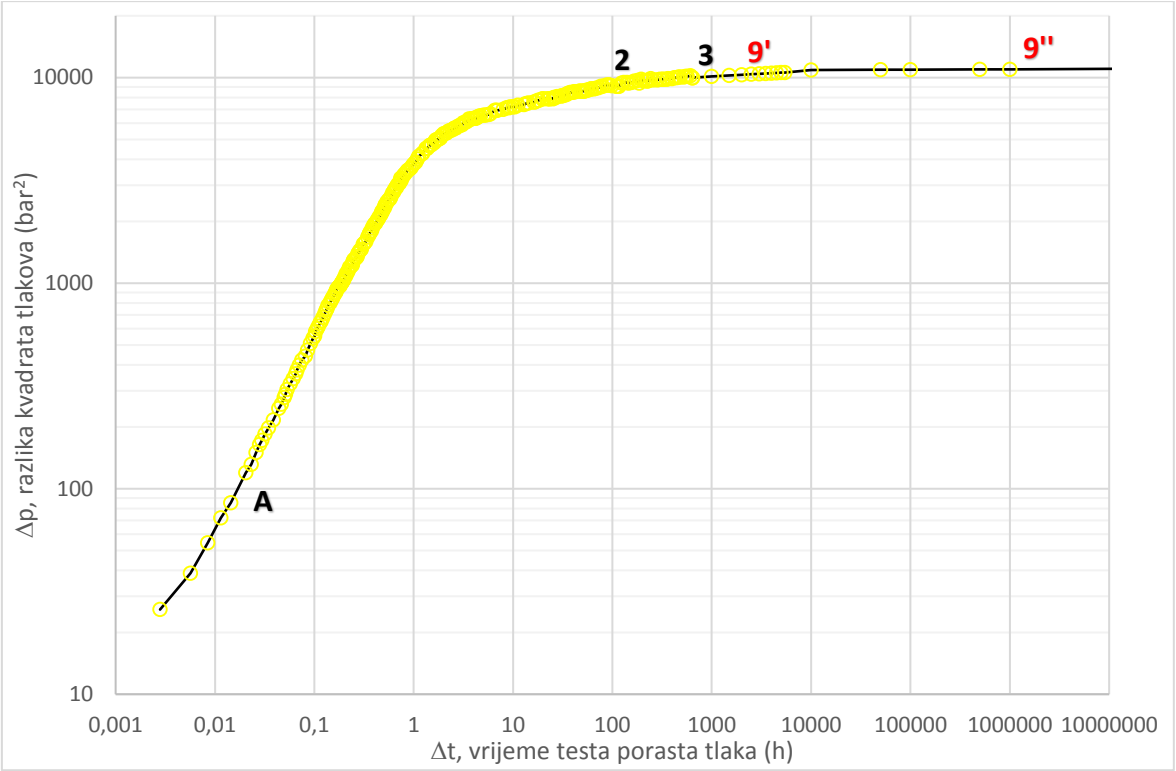


Slika 75: Segmenti trajanja testa za ekstrapolaciju krivulje porasta tlaka do točke 9"

Tablica 22: Podaci za cjelovitu ekstrapoliranu krivulju testa porasta do točke 9"

Točke	Δt (h)	Δp (bar²)	$y_{9'-9''}$ (bar²)	$y_{9'-9''}$/Δp (%)	Δp (bar²)
1.	2,8E-3	25,83			25,83
A	2,32E-2	131,47			131,47
2	9,88E+1	9142,75			9142,75
3	6,43E+2	10010,31			10010,28
9'	5,46E+3	10606,65	10603,13	0,03	10603,13
D10	1E+4		10888,74		10888,74
D11	5E+4		10923,85		10923,85
D12	1E+5		10939,00		10939,00
D13	5E+5		10974,27		10974,27
D14	1E+6		10989,49		10989,49
9''	1,59E+7	11373,59	11050,51	2,84	11050,51

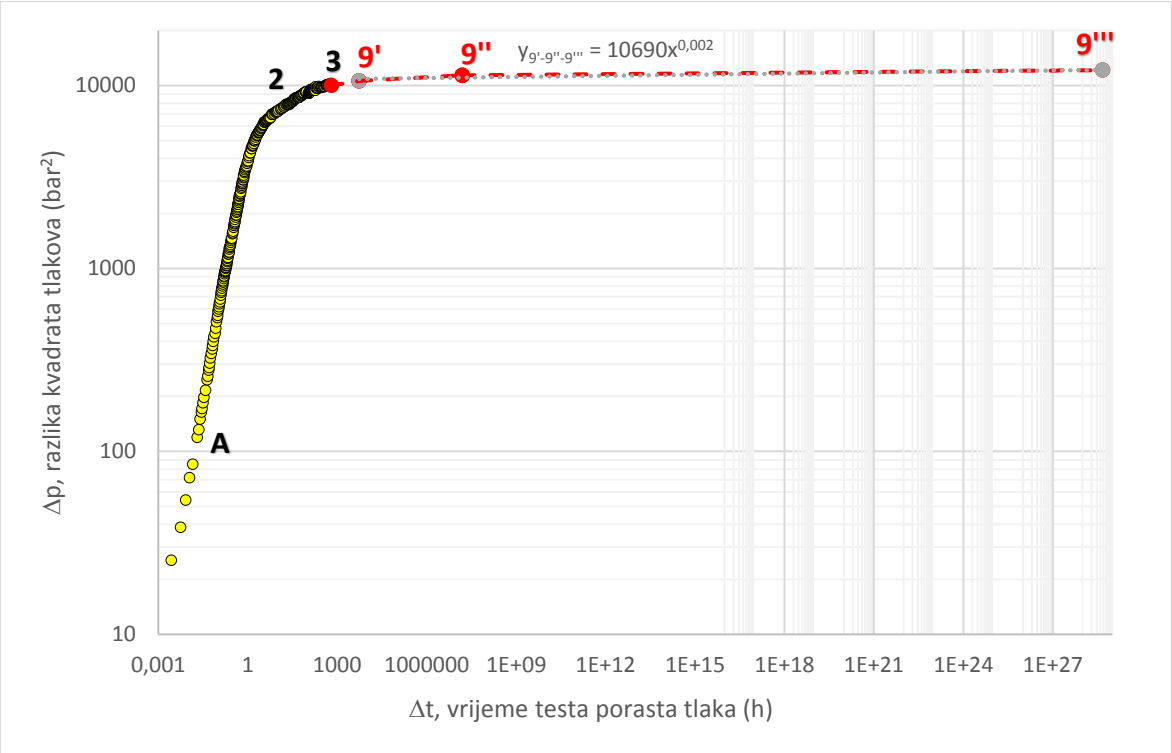
Na slici 76 je žutom bojom dan konačan izgled ekstrapolirane krivulje porasta prema podacima iz tablice 22.



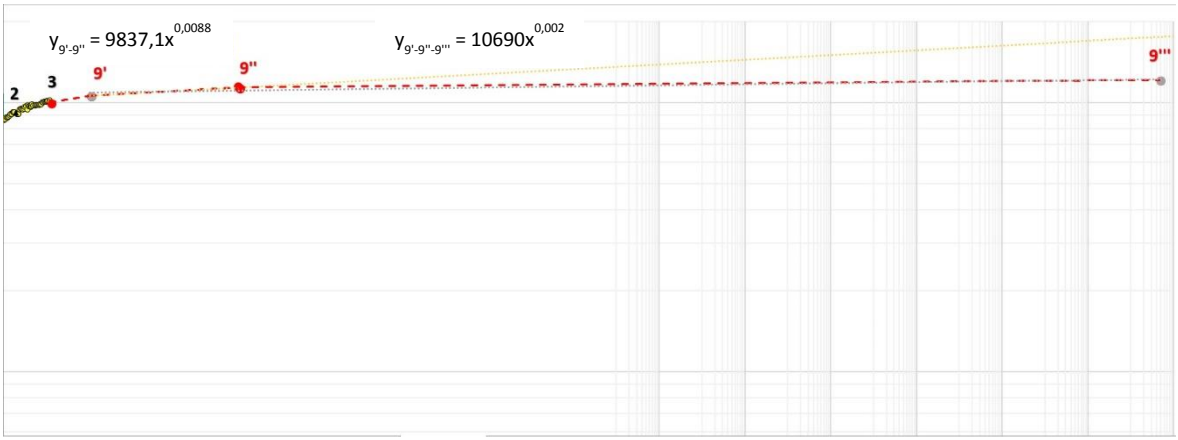
Slika 76: Optimalno ekstrapolirana krivulja porasta do točke 9"

4.3.6.c Ekstrapolacija krivulje testa porasta do točke 9'''

I u ovoj ekstrapolaciji se najprije istraživalo koja odstupanja bi se dobila, ukoliko bi se cijeli nepoznati segment od točke 9' do točke 9''', aproksimirao jedinstvenom jednadžbom ($y_{9'-9''-9'''}$), označenom sivom točkastom linijom na slici 77. Pretpostavkom primjene jedinstvene jednadžbe na cijelo nepoznato područje krivulje potvrđeno je pravilo svih prethodnih slučajeva da ovaj izraz nema prihvatljivu točnost za aproksimaciju prvog dijela ovako dugog segmenta trajanja testa porasta tj. da ga se ne može primijeniti na područje krivulje od točki 9' do 9''. Stoga je za taj segment ostavljena aproksimacija ($y_{9'-9''}$), a u nastavku je, logički, krivulja ekstrapolirana do krajnje točke temeljem jednadžbe ($y_{9''-9'''}$). Nadogradnja podataka za cijelu krivulju dana je u tablici 23, gdje je vidljivo i vrlo malo odstupanje od samo 0,5% za ekstrapoliranu točku 9''', a optimirana krivulja prikazana je na slici 79. U istoj tablici su, u svrhu detaljnije ekstrapolacije kao i u prethodnom segmentu, dodane točke za vrijeme testa porasta od D15 (1E+9 h) do D19 (1E+21 h).



Slika 77: Segmenti trajanja testa za ekstrapolaciju krivulje porasta tlaka do točke 9'''



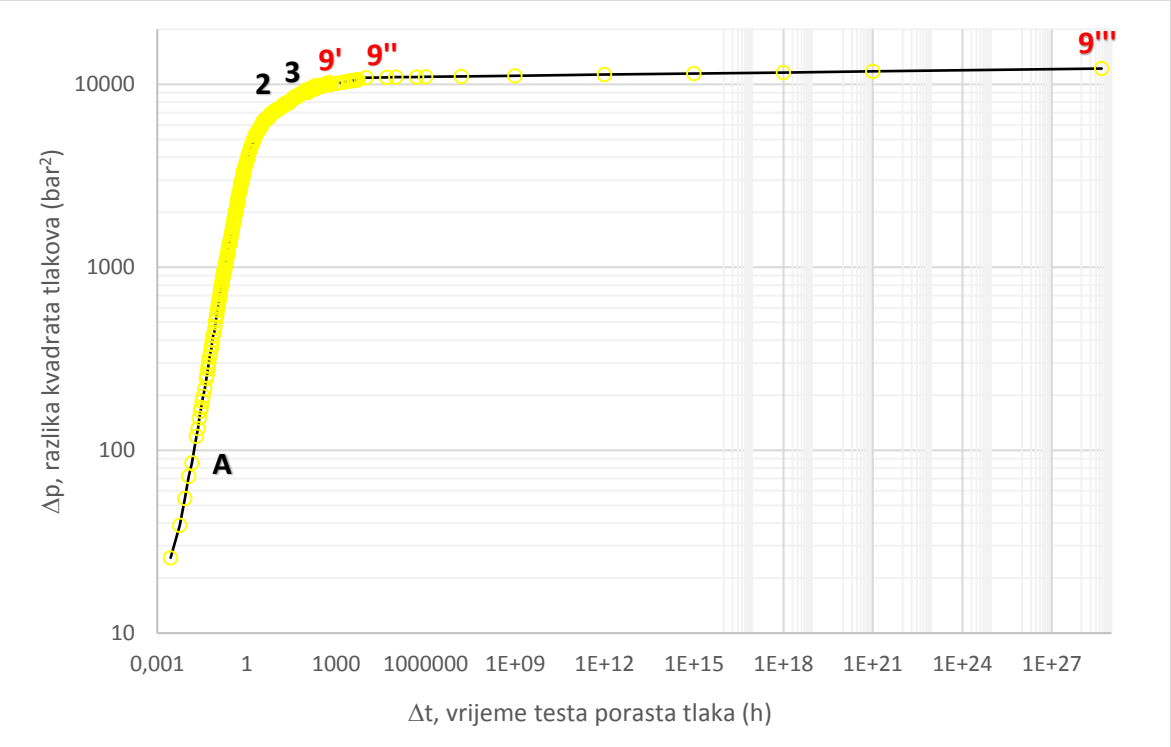
Slika 78: Usporedba točnosti aproksimacija krivulje porasta za segmente trajanja do 9'''

U analizi ovog segmenta su izdvojene još dvije bitne činjenice za razvoj metode u sljedećim koracima. Naime, kako je na slici 77 po prvi puta dan dijagram sa skalom apscise do krajnje točke izjednačavanja tlaka u ležištu, odnosno do vrijednosti 1E+28 sati, na slici 78 je žutom bojom prikazana ekstrapolacija aproksimacije iz prethodnog segmenta ($y_{9'-9''}$) do točke 9'''. Kao prvo, vidljivo je da bi ovaj pravac u duboko nepoznatom području predvidio porast tlaka na vrijednost puno veću od početnog ležišnog tlaka. No, prema matematički dokazanim vrijednostima iz tablice 15, tlak bi u ovom imaginarno dugom periodu porastao

samo za približno 4 bara tj. sa 109 na mogućih 113 bara. Kao drugo, ovaj pravac ($y_{9'-9''}$) bi predvidio postizanje stvarnog početnog tlaka relativno brzo nakon točke 9", te bi ovo ekstremno dugo trajanje segmenta stabilizacije tlaka u ležištu od točki 9" do 9"' bilo gotovo zanemareno.

Tablica 23: Podaci za cjelovitu ekstrapoliranu krivulju testa porasta do točke 9"'

točke	Δt (h)	Δp (bar^2)	$y_{9''-9'''}$ (bar^2)	$y_{9''-9'''}$/Δp (%)	Δp (bar^2)
1.	2,8E-3	25,83			25,83
A	2,32E-2	131,47			131,47
2	9,88E+1	9142,75			9142,75
3	6,43E+2	10010,31			10010,28
9'	5,46E+3	10606,65			10603,13
9"	1,59E+7	11373,59			11050,51
D15	1E+9		11142,37		11142,37
D16	1E+12		11297,38		11297,38
D17	1E+15		11454,54		11454,54
D18	1E+18		11613,89		11613,89
D19	1E+21		11775,46		11775,46
9"'	4,71E+28	12140,53	12198,99	0,48	12198,99



Slika 79: Optimalno ekstrapolirana krivulja porasta do točke 9"'

S obzirom na poznatu činjenicu da u ekstremno slabo propusnim ležištima prijelazno stanje protjecanja, u kojem se ležište ponaša kao neograničeno, može trajati i do izjednačavanja tlaka u ležištu, radi daljnje točnosti primjene metode, ispitano je može li se pretpostaviti početak polu-stacionarnog stanja u bušotini, prema jednadžbi (2.14). Iako se ona koristi kod proizvodnog testa uz pretpostavku konstantnog protoka u bušotini, a ovdje se radi o testu porasta, s vremenom izračunatim jednadžbom (4.14) se pretpostavlja da do polu-stacionarnog oblika protoka neće doći niti u proizvodnom testu. Utjecaj granice ležišta se općenito može odraziti na povijanje krivulje porasta pri kraju područja stabilizacije tlaka, iako se ona puno jače odražava na krivulji derivacije. Stoga je utjecaj granice na iscrpljenost ležišta potrebno ispitati prije razvoja sljedećeg koraka. Ako se u jednadžbu (4.14) uvrste podaci iz tablice 2 o bušotini na ležištu Eagle Ford, iz prve procjene slijedi da bi se tlak u ležištu mogao početi odvijati prema uvjetima ograničenog ležišta tek nakon približno 216,44 godine proizvodnje, tj. nakon 1,89E+6 sati. Za ovu procjenu trebalo je uvrstiti podatak o ležišnoj propusnosti, *k*, koju se tek određuje u krajnjem koraku metode, pa je uzeta njena pretpostavljena vrijednost iz originalnog rada od 6600 nD:

$$t_{pss} = \frac{\phi \mu c_t r_e^2}{4k} \approx \frac{0{,}1 \times 0{,}000015 \times 6{,}4 \times 10^{-8} \times 1370{,}076^2}{4 \times 6{,}6 \times 10^{-18}} \approx 6{,}82 \times 10^9 s \approx 1{,}89 \times 10^6 h \approx 216{,}44 godine \qquad (4.14)$$

Odavde proizlazi da bi ekstrapolirani dio krivulje porasta na slici 79 nakon tog vremena imao nešto veći nagib, samo u slučaju kada bi i derivacija krivulje na slici 84 u tom istom periodu promijenila nagib, do čega nije došlo. No, da je nakon pojave pseudo-radijalnog protoka u testu porasta i ustanovljen polu-stacionarni protok, on bi u ovom mjerilu rezultirao gotovo neprimjetnim nagibom na krivulji porasta, jer je dokazano da je pozicija točke 9''' točna. Kod primjene jednadžbe (4.14) i ove metode na buduće testove porasta u kojima se možda neće unaprijed raspolagati niti s približnom procjenom propusnosti stijene, do greške neće doći ukoliko se derivaciju produži do krajnje ekstrapolirane točke. Tako je učinjeno i u sljedećem koraku na konačnoj slici 84, jer je za primjenu metode jedino bitno da dođe do razvoja kasnog pseudo-radijalnog protoka, odakle je moguće odrediti propusnost stijene.

Osim toga, za prvu procjenu početka polu-stacionarnog stanja (jednadžba 4.14) u slučaju proizvodnog testa, iznos drenažnog radijusa je poistovjećen s iznosom duljine horizontalnog kanala bušotine od 1370,1 m, jer granice ležišta u originalnom radu nisu poznate, pa su u sljedećoj aproksimaciji u jednadžbi (4.15) unesene nove pretpostavljene vrijednosti. Poznato je da se granice slabo propusnih ležišta mogu rasprostirati u dužini i širini i do nekoliko desetaka kilometara. Stoga se tzv. imaginarno vrijeme od 216 godina

može uzeti kao najranije moguće za početak utjecaja granica ležišta za slučaj proizvodnje, jer se vrijednost od 1 kilometra podrazumijeva minimalnom za drenažni radijus. Granice ležišta za ovu bušotinu nisu procijenjene, jer je ona neposredno prije mjerenja testa porasta tlaka po prvi puta počela proizvoditi. Utjecaj granica ležišta važan je i u metodologiji RTA (engl. *Rate Transient Analysis*), kojom se određuju ukupno otkrivene količine plina u ležištu, *G*, (engl. *Gas Initially In-Place*) (jednadžba 4.15), ali koja za slabo propusna ležišta također ne daje pouzdane rezultate (Uzun et al., 2016). U analiziranom primjeru testa porasta je napomenuto da je bušotina prije testa proizvodila s ekstremno visokim protokom plina od 83,4E+6 m^3/dan, što je očito imalo za glavnu svrhu eventualno postizanje što ranijeg pseudo-radijalnog protoka. S obzirom da je u primjeni metodologije tipskih krivulja i derivacije tlaka nužno da u bušotini prije zatvaranja dođe do pseudo-radijalnog protoka, a što je isto tako važno i za određivanje propusnosti razvojem nove metode, pretpostavlja se da će bušotina kasnije proizvoditi manjim protokom od 8,34E+6 m^3/dan, odnosno 3,04E+9 m^3/godinu. U tom slučaju bi se do postizanja pseudo-radijalnog protoka određenog za slučaj testa porasta u vremenu od 5,7 godina (slika 84), iz ležišta iscrpilo oko 1,73E+10 m^3 plina. Realnost ovih proizvedenih količina provjerena je kroz izračun otkrivenih količina plina, *G*, gdje se pretpostavlja rasprostiranje ležišta za iznos drenažnog radijusa od 20 km:

$$G = \frac{Ah\phi(1-S_w)}{B_g} = \frac{20000^2 * \pi * 22 * 0{,}1 * 1}{3{,}58 \times 10^{-2}} = 7{,}724 \times 10^{10} m^3 \qquad (4.15)$$

To znači da bi za prvu procjenu ova bušotina mogla proizvoditi oko 25 godina, a ovu vrijednost bi još trebalo umanjiti ovisno o iznosu iscrpka. Za drenažni radijus od 25 km njen vijek bi bio oko 40 godina, a do točnijeg iznosa bi se došlo razvojem metode RTA. Ako se s ovim iznosom drenažnog radijusa ponovno izračuna vrijeme polu-stacionarnog protoka za slučaj proizvodnog testa kao u jednadžbi (4.14), dobila bi se vrijednost od oko 72 000 godina. Odavde se u potpunosti može zaključiti ono što je najvažnije za primjenu nove metode, bez obzira na približne vrijednosti ležišnih parametara prethodnih jednadžbi, da niti u jednom trenutku proizvodne faze ove bušotine ne bi došlo do polu-stacionarnog stanja. S time je ispunjen uvjet za prilagodbu poznatih metoda analize testova porasta tlaka u slabo propusnim ležištima. Isto tako, s obzirom na izračunate vrijednosti eventualnog početka polu-stacionarnog stanja, slijedi da bez obzira na iscrpljene količine nekog ležišta, svaka bušotina može biti podvrgnuta testu porasta tlaka u bilo kojem trenutku proizvodne faze. To znači, da se promijenjeni uvjeti u ležištu neće odraziti na oblik krivulje porasta, tj. da će

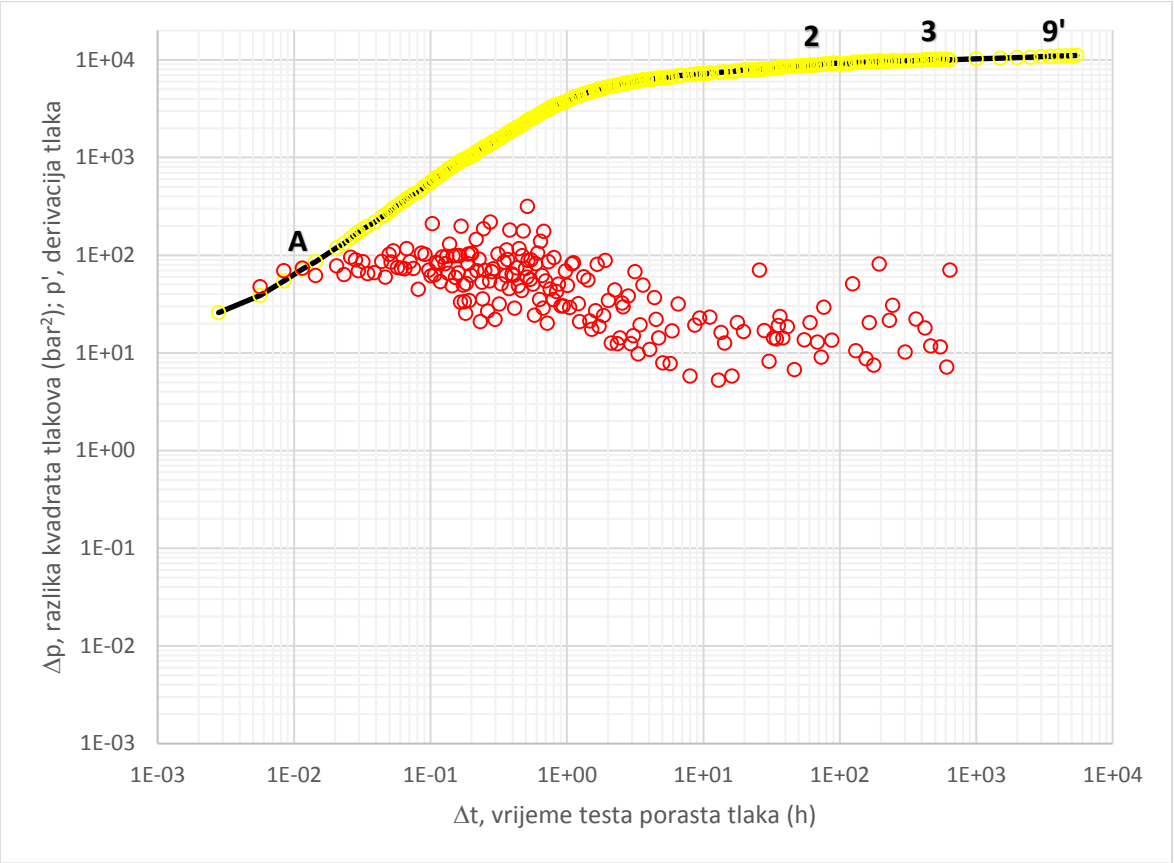
uvijek doći do segmenta u kojem je s pomoću nove metode moguće utvrditi pseudo-radijalni oblik protoka.

Na kraju ovog koraka metode, ekstrapolirani su segmenti krivulje porasta tlaka do tzv. imaginarnog položaja točke 9'", u vremenski duboko nepoznatom području. Ovime je dokazano da je ona uvedena kao neophodna, isključivo za mogućnost određivanja pseudo-radijalnog protoka. Na završni dijagram derivacije na slici 84 dodana je i granica iscrpljenosti ležišta (40 godina), uz napomenu da se ona odnosi na proizvodni test, dok se vrijeme pojave pseudo-radijalnog protoka (5,7 godina) odnosi na test porasta.

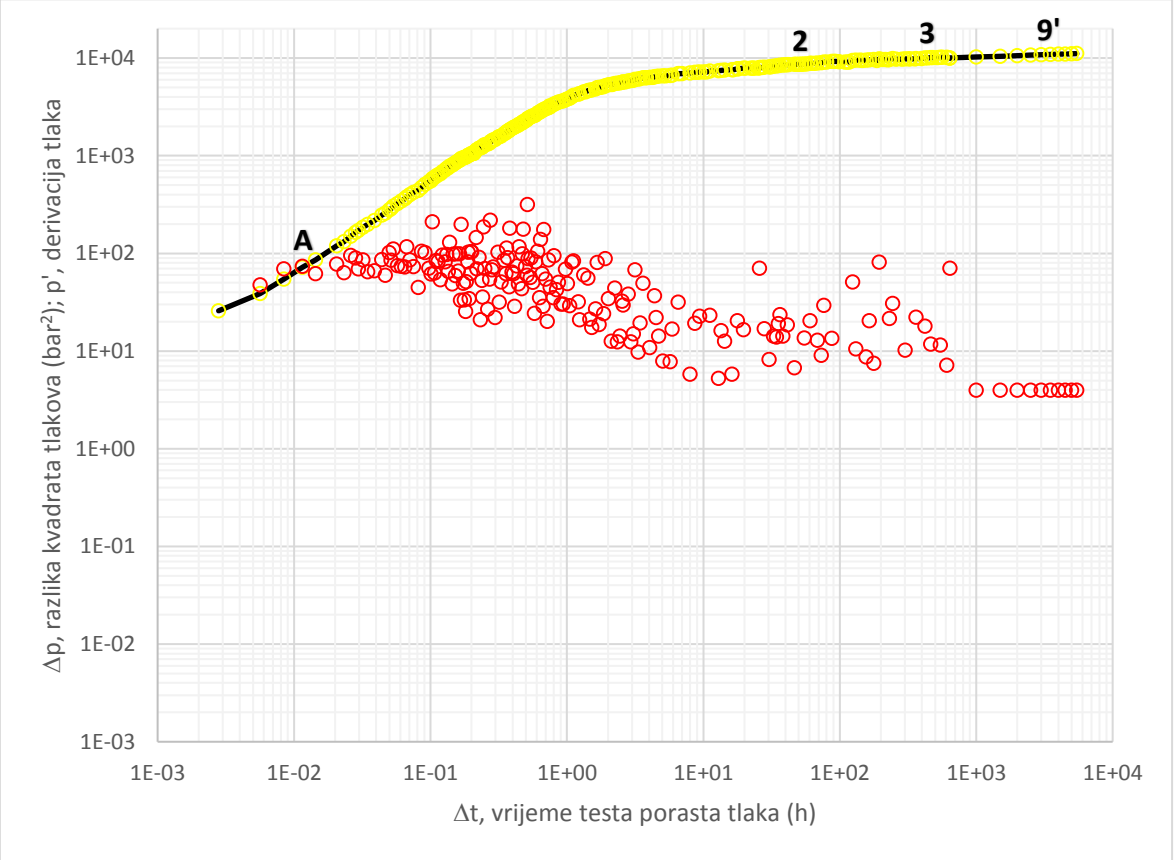
4.3.7. Šesti korak – derivacija ekstrapolirane krivulje testa porasta

Derivacija krivulje testa porasta koristi se zajedno s krivuljom porasta u log-log dijagramu kao metoda analize testa porasta u svim suvremenim softverima za određivanje propusnosti ležišne stijene, prema već opisanom principu nagiba krivulja (slike 12 i 46a), odnosno po metodi neograničeno djelujućeg radijusa. Za konačnu krivulju porasta tlaka prikazanu na slici 79, u pretposljednjem koraku metode je detaljno analizirana njena derivacija tj. nagib krivulje derivacije u log-log dijagramu, na slikama od 80 do 84. Za svaki pojedini segment krivulje porasta, od perioda trajanja testa porasta tlaka u točci 3 do točke 9'", prikazana je promjena njene derivacije. Tek se iz dijagrama na slici 84 moglo zaključiti koji je stvarni trenutak početka i trajanja kasnog pseudo-radijalnog protoka, tijekom kojeg krivulja derivacije konstantno ima nagib 0. Time je ispunjen osnovni cilj istraživanja, jer je nova metoda za analizu testa porasta tlaka slabo propusnog ležišta uspješno razvijena. Osim toga, ovime je ispunjen i cilj mogućnosti primjene metode na testove porasta u svim slabo propusnim ležištima. Temeljem ovog otkrića dokazana je i hipoteza doktorskog rada da se postojeće metode za određivanje propusnosti stijene u konvencionalnim plinskim ležištima mogu prilagoditi za primjenu i na nekonvencionalna ležišta plina. To je pokazano u sljedećem koraku metode kroz uporabu efektivnog radijusa bušotine i modifikaciju Bourdet log-log dijagrama, kao i kroz modifikaciju izraza za određivanje propusnosti stijene.

Derivacija krivulje porasta tlaka do točke 9' najprije je na slici 80 prikazana samo do točke 3 iz razloga što bi se iz ove analize moglo pretpostaviti da trend derivacije i dalje ostaje isti ili da se nagib mijenja na sasvim drugačiji način od stvarnog, danog usporedno na slici 81.



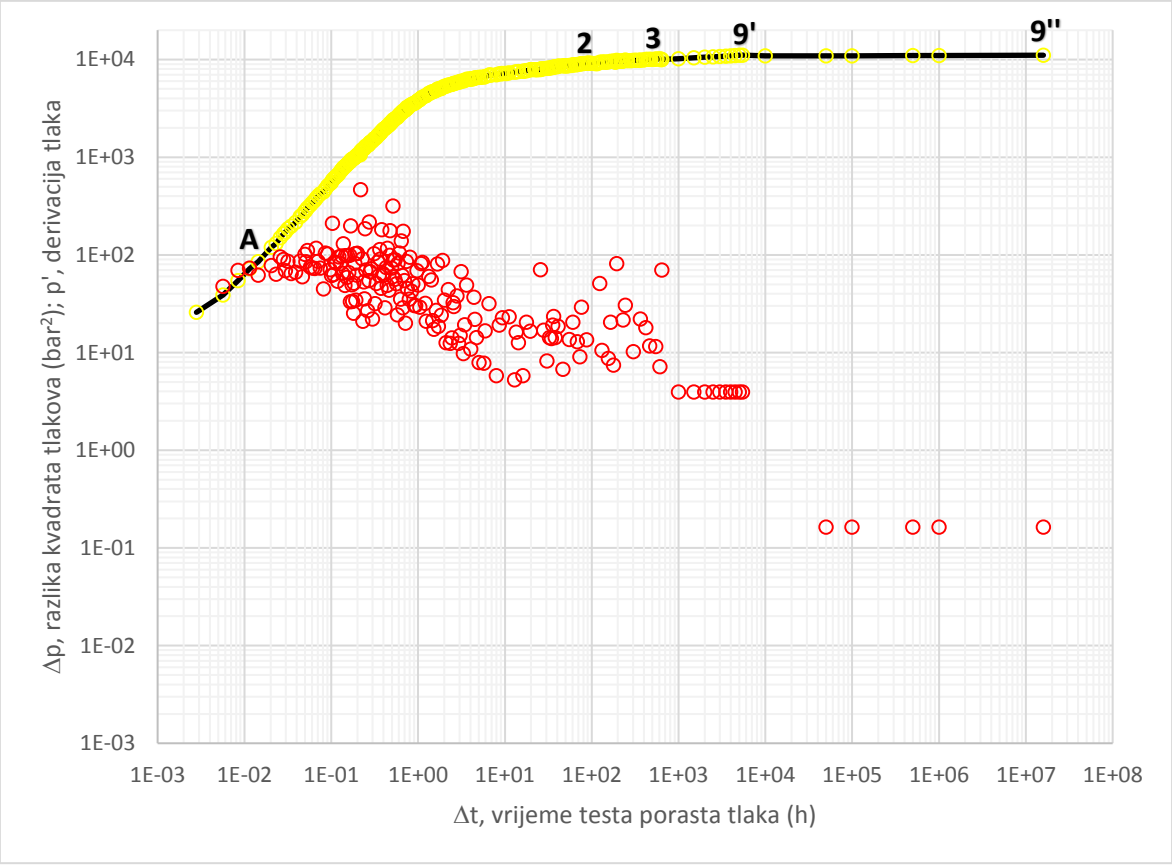
Slika 80: Derivacija krivulje porasta do točke 9' prikazana do točke 3



Slika 81: Derivacija krivulje testa porasta tlaka do točke 9'

Dosadašnje metode za analizu testa porasta slabo propusnih ležišta, koje se temelje na simulacijama i opisane su u 3. poglavlju, prognozirale su tijek nagiba derivacije u nepoznatom području uglavnom temeljem uvida u njen trend do točke 3. U tim modelima je, kao što je pojašnjeno u prethodnom koraku, prvenstveno precijenjena ekstrapolacija same krivulje porasta. Time je i predviđena derivacija u periodu trajanja testa od točki 3 do 9' također otišla u sasvim suprotnom smjeru od nagiba prikazanog na slici 81. S obzirom na ovu konstataciju, tijekom razvoja nove metode se uvidjelo da najbliža procjena pojave eventualnog kasnog pseudo-radijalnog protoka može biti pouzdanija ukoliko se ispita nagib derivacije skroz do krajnje točke tzv. imaginarnog vremena trajanja testa porasta tlaka tj. do točke 9'". Stoga je kao prvi sljedeći segment na slici 82, analizirana derivacija krivulje testa porasta do točke 9" i opet je došlo do iznenađenja, jer nagib niti nakon trajanja testa do točke 9' nije ostao isti.

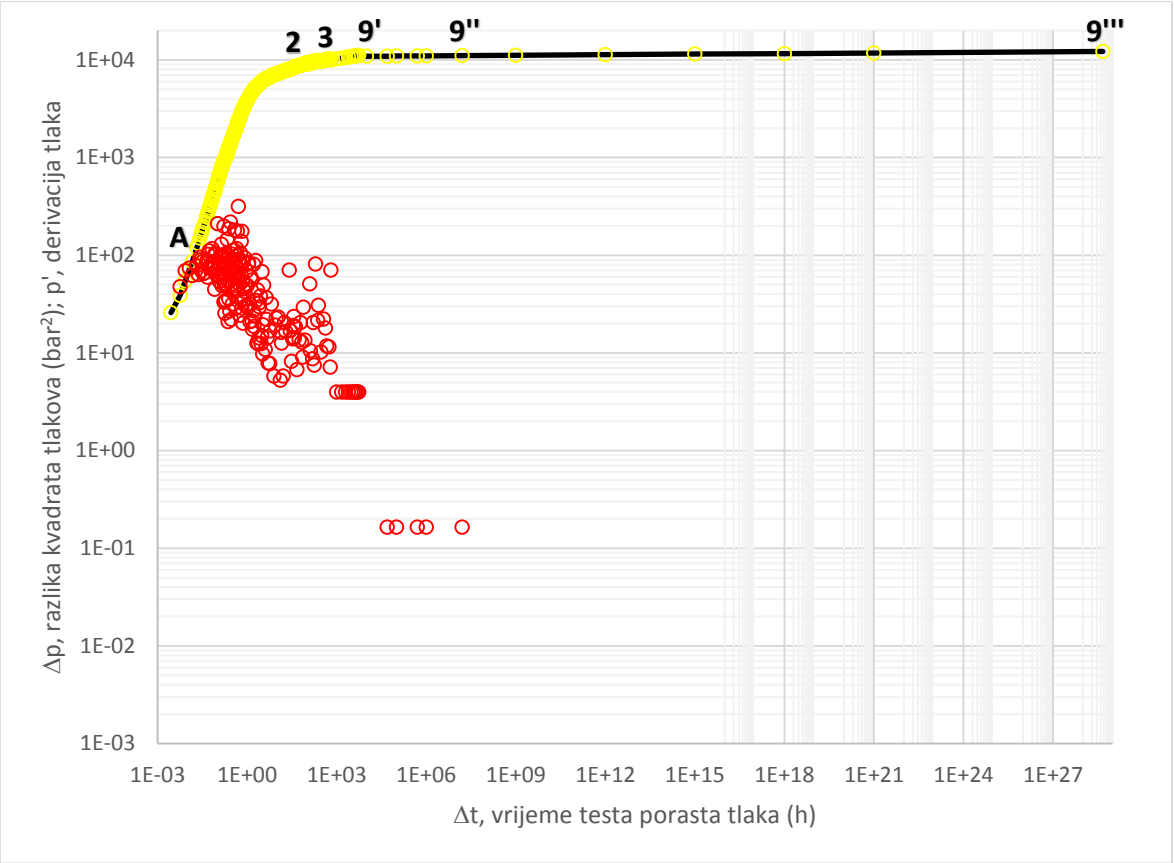
Odavde proizlaze dvije činjenice. Prva se ponovno odnosi na dokaz kako trend nagiba derivacije ide suprotno od očekivanog u dosadašnjim simuliranim modelima. Kao drugo, iako se točka 9" nalazi duboko u nepoznatom području, i dalje ostaje ključno pitanje, je li ovo konačno postignut pseudo-radijalni protok oko višestruko frakturirane horizontalne bušotine ili će derivacija krivulje i dalje mijenjati svoj nagib.



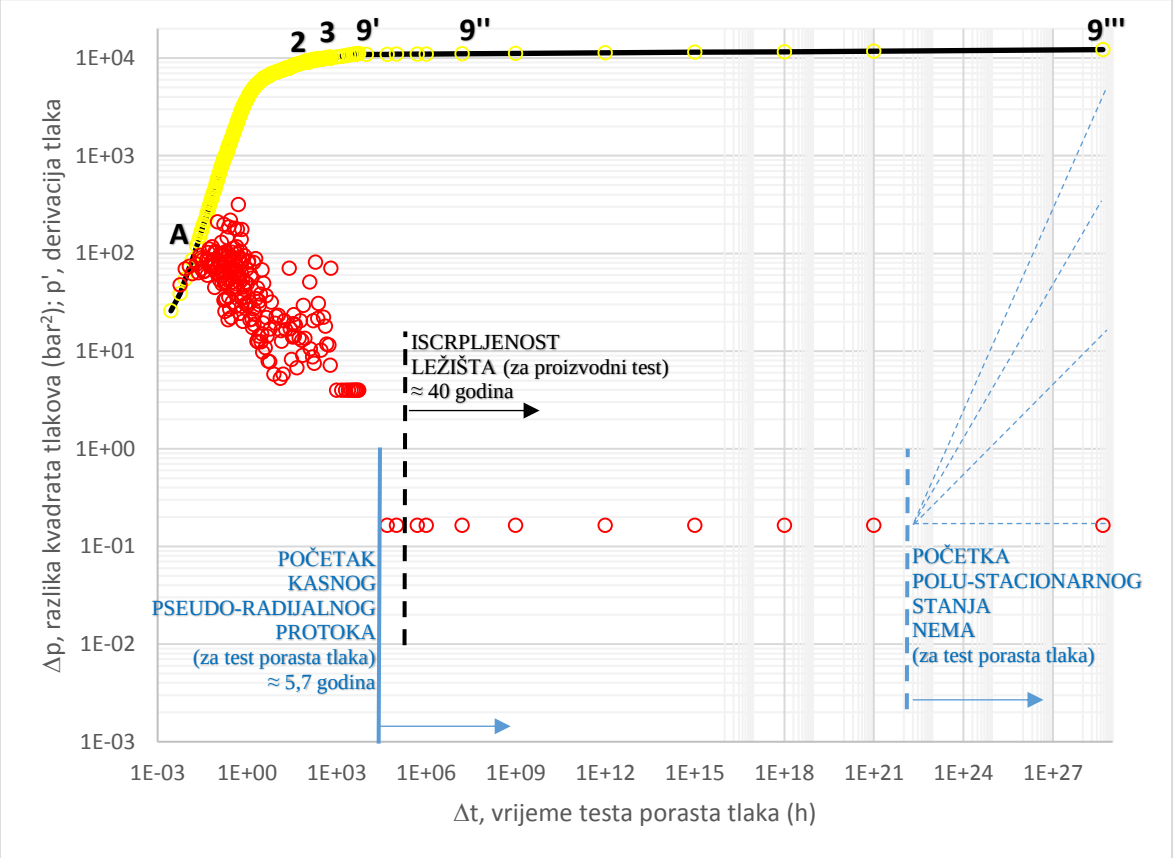
Slika 82: Derivacija krivulje testa porasta tlaka do točke 9"

Na slici 83, analogno slikama 81 i 82, još uvijek nije razvidno je li ovo konačan pseudo-radijalni protok ili će pri završetku nepoznatog područja krivulje porasta, njena derivacija nastaviti mijenjati nagib. No, slikom 84 je potvrđeno da daljnje promjene u prijelaznom periodu protoka više nema. Odavde također slijedi da se navedenom metodom može pretpostaviti da bi konačni pseudo-radijalni protok u ovoj bušotini mogao nastupiti nakon 50 000 sati, odnosno za 5,7 godina.

Iz svega navedenog, u razvoju primjene derivacije, slijedi nekoliko napomena. Kao prvo, derivacija u nepoznatom području stabilizacije tlaka u ležištu slijedi iz pretpostavljene krivulje porasta tlaka, ekstrapolirane segment po segment jednadžbama potencije, koje u log-log dijagramu imaju oblik pravca. S obzirom da se u vrlo dugom vremenu očekuje porast tlaka u ležištu od samo nekoliko bara, s velikom vjerojatnošću se može uzeti da krivulja porasta u cijelom nepoznatom području slijedi oblik pravca. Stoga se njeno modeliranje kroz nekoliko segmenata od točke 3 do točke 9''' može uzeti kao pouzdano za daljnju analizu derivacijom. Kao drugo, određivanje kasnog pseudo-radijalnog protoka ovisi o uvjetima u ležištu što dokazuje i promjena nagiba derivacije u nepoznatom području stabilizacije tlaka. Iako je njen nagib konstantan i iznosi 0,168 (slika 84), promjena ove konstantne vrijednosti se ne mijenja segment po segment, što bi značilo da samo slijedi pretpostavljene ekstrapolacije krivulje porasta. Važno je uočiti da do promjene nagiba dolazi u području trajanja testa porasta tlaka između točki 9' i 9'', što dodatno potvrđuje točnost određivanja početka pseudo-radijalnog protoka, ovisnog prvenstveno o ležišnim uvjetima, a ne o odabranoj metodi ekstrapolacije krivulje. Kao što se vidi iz log-log dijagrama, njegovo trajanje bi bilo u periodu od 5,7 godina (5E+4 h) pa sve do izjednačavanja tlaka u ležištu!



Slika 83: Derivacija krivulje testa porasta tlaka do točke 9''' prikazana do točke 9"



Slika 84: Derivacija krivulje testa porasta tlaka do točke 9'''

Vremenska granica za iscrpljenost ležišta od 40 godina je unesena crtkanom linijom, jer se odnosi na proizvodni test, a ne na zatvorenu bušotinu, kao što je pojašnjeno u prethodnom koraku. Međutim, za daljnji razvoj metode se kod prilagodbe poznatih metoda za određivanje propusnosti stijene u programu Saphir, pretpostavlja da bušotina proizvodi konstantnim protokom dulji period prije zatvaranja za mjerenje, kako bi se barem približno ispunio nužan uvjet postizanja neograničeno djelujućeg radijusa. Stoga se slikom 84 ukazuje, da bez obzira na slučaj u kojem bi test porasta započeo u kasnijoj fazi rada bušotine, za očekivati je da bi pseudo-radijalni protok ponovno nastupio u istom periodu od 5,7 godina, jer bi krivulja porasta imala gotovo identičan oblik, pa time i isti iznos derivacije u istom periodu trajanja testa.

Osim toga, iz usporedbe derivacije mjerenog dijela krivulje porasta u odnosu na derivaciju njenog ekstrapoliranog dijela, proizlazi da crvene točke slijede odgovarajući trend, sličan konvencionalnom obliku krivulje derivacije. To se najbolje uočava na slici 81, gdje je dijagram dan u najmanjem rasponu skale za trajanje testa do 10 000 sati, za razliku od slika 83 i 84, gdje skala završava s vrijednošću reda veličine 1E+30 sati. Radi toga, oblik krivulje derivacije na krajnjim dijagramima u području skladištenja izgleda drugačije u usporedbi s oblikom povijanja poznatih tipskih krivulja, koje se primjenjuju za slučaj radijalnog protoka fluida u ležištu (slika 11).

S ovim korakom završen je prvi dio razvoja nove metode, a njegova primjenjivost i na ostalim testovima porasta tlaka ispitana je i dokazana u 5. poglavlju. No, prije nastavka modifikacije poznatih metoda za određivanje propusnosti stijene u slabo propusnim ležištima, treba se vratiti na tablicu 4. U njoj je postavljen uvjet određivanja tlaka na krivulji porasta, koji bi nastupio mjesec dana nakon trajanja testa (točka 3), i to samo temeljem podataka četverodnevnog mjerenja (točka 2). Završetkom razvoja ovog dijela metode može se zaključiti da se poznavanjem tlaka u točki 2 tj. trajanjem testa od samo sto sati može pouzdano odrediti tlak krivulje porasta za trajanje testa skroz do postizanja početnog ležišnog tlaka (točka 9''') (tablica 24). Ovime je dokazana jedna od hipoteza rada da se analizom testa porasta tlaka može minimizirati trajanje ispitivanja u bušotinama slabo propusnih plinskih ležišta.

Tablica 24: Rezultat ekstrapolacije za krajnju točku krivulje testa porasta tlaka

Točke	**Oznake**	**Krivulja, Δp (h, bar^2)**	**Mjereni tlak, p_{ws} (bar)**
2	(Δt_2; Δp_2)	(98,8; 9142,56)	99,14
3	(Δt_3; Δp_3)	(643; 10010,15)	103,43
9'''	($\Delta t_{9'''}$; Δp_i)	(4,71E+28; 12198,99)	**113,8**

4.4. Prilagodba metoda tipskih krivulja i derivacije tlaka

Nakon postupka određivanja trajanja pseudo-radijalnog protoka, opisanog kroz prethodnih šest koraka metode, drugi dio razvoja metodologije odnosi se na novu primjenu tipskih krivulja i derivacije tlaka u slabo propusnim plinskim ležištima pješčenjaka i šejlova. Prilagodba ovih dviju metoda može se primijeniti i u programu Saphir, gdje se bazira na efektivnom radijusu bušotine, r_w', kojeg je moguće izračunati za svaki tip stimulirane bušotine. Tada se svaku bušotinu može analizirati ekvivalentno vertikalnoj bušotini, s radijusom jednakim efektivnom radijusu, r_w'. To znači da se u analizi testa porasta tlaka može primijeniti rješenje jednadžbe difuzije za radijalni protok (jednadžba 2.26, odnosno 2.28). U njega se ne uvrštava skin faktor, *s*, jer je već izražen kroz vrijednost efektivnog radijusa bušotine, r_w', čiji iznos se može kretati u rasponu reda veličine i do 1000 m. Ukoliko su poznata osnovna svojstva ležišta, bušotine i fluida, odnosno plina, efektivni radijus, r_w', se za frakturiranu bušotinu određuje prema jednadžbama na slici 22, ovisno o iznosu bezdimenzionalne vodljivosti frakture, C_{fD}, dok za višestruko frakturiranu horizontalnu bušotinu ovaj radijus, r_w', slijedi iz jednadžbe (2.53).

Za razliku od analize testova porasta tlaka pri pseudo-radijalnom protoku, čiji je glavni nedostatak dugo trajanje do njegove uspostave, a kojem se u ovoj metodi doskočilo kroz prethodno opisane korake, nedostatci analize ostalih oblika protoka su također u nepouzdanosti njihovog određivanja. Iako bi do njihove pojave trebalo doći prije pseudo-radijalnog protoka, testovi porasta tlaka u trajanju od 3 do 4 dana su još uvijek prekratki za pouzdano određivanje bilo kojeg oblika protoka u slabo propusnim ležištima, koji bi nastupili prije pseudo-radijalnog. Fizikalno značenje pojedinih oblika protoka opisano je u 2. poglavlju, a svi oblici su jedinstveno sistematizirani prema osnovnim nagibima pravaca za pojedini protok uz originalni Bourdet log-log dijagram (slike 46a i b), te u odlomku 3.1 za VFHB. Nagib krivulje za period skladištenja fluida iznosi 1, za linearni oblik protoka je ½, a za bilinearni ¼, sve do radijalnog protoka s nagibom krivulje porasta i njenom derivacijom koji iznose 0. Metodologija za određivanje propusnosti stijene temeljem preklapanja mjerenih podataka i tipskih krivulja za radijalni protok objašnjena je s pomoću slike 11. U slučaju ostalih oblika protoka u drugim tipovima bušotina izrađene su odgovarajuće tipske krivulje ili su dana analitička rješenja za određivanje propusnosti, prema rješenjima jednadžbi difuzije za pojedine modele bušotina u konvencionalnim ležištima. S obzirom da se u većini bušotina nakon prestanka utjecaja efekta skladištenja fluida najprije javlja linearni protok, suvremene metode za analizu testa porasta tlaka u slabo propusnim

ležištima, kao što su Lougheedova (odlomak 3.1) i Houzeova (odlomak 3.3), su orijentirane na nove izvode rješenja za linearni protok u slabo propusnim plinskim ležištima. Međutim, i sami autori navode da ona nisu dovoljno pouzdana, ako test ne traje dovoljno dugo da bi nagib krivulje derivacije od ½ odgovarao upravo linearnom protoku. Tome u prilog govore i nagibi pravaca u njihovim analizama, prikazani na slikama 30 i 34. Osim toga, ukoliko se analizira promjena nagiba derivacije na slikama od 80 do 84, jasno se uočava da povlačenje pravca bilo kojeg nagiba kroz točke mjerenja u tom području krivulja, ne bi bilo pouzdano skroz do pojave pseudo-radijalnog protoka, gdje je nagib 0. No, u slučajevima kada se ove suvremene metode i mogu pouzdano primijeniti, one opet daju rješenje samo za linearni protok. Iz analize testova porasta konvencionalnih ležišta je poznato da do njegovog razvoja u ležištu ne mora uvijek niti doći, jer kao prvi može nastupiti i bilinearni, za koji u ovom slučaju rješenje ne bi bilo predviđeno. Osim toga, ukoliko bi istraživanja analize testova porasta tlaka slabo propusnih ležišta i dalje išla u ovom smjeru, odnosno kada bi sva ona bila poznata za svaki oblik protoka u svakom tipu stimulirane bušotine, kao što je to slučaj za konvencionalna ležišta, ova rješenja za propusnost stijene i dalje ne bi bila primjenjiva, radi nedovoljnog trajanja testa porasta. Stoga je za razvoj nove metode odabran pseudo-radijalni protok, za koji je potrebno prilagoditi tipske krivulje i derivaciju tlaka sa slike 11, kako bi se mogla odrediti propusnost slabo propusnog ležišta, modifikacijama jednadžbe (2.29).

Analiza stimuliranih bušotina se odnosi na tzv. *'post-frac'* testove porasta, no prema novoj metodi moguće je analizirati i *'pre-frac'* test porasta tlaka. To je slučaj vertikalne bušotine, u kojoj bi također najprije trebalo doći do pseudo-radijalnog protoka, kako bi se ispunio ranije opisani preduvjet za primjenu tipskih krivulja. U praksi, to nije vjerojatno za očekivati, jer bi vertikalna bušotina prije postupka stimulacije trebala proizvoditi konstantnim protokom tijekom duljeg vremena. No novu, prilagođenu metodu moguće je teoretski provesti, poštujući ovu pretpostavku. U tom slučaju bi se u rješenje jednadžbe difuzije uvrstio efektivni radijus vertikalne bušotine, r_w', prema jednadžbi (2.7), koji je jednak stvarnom radijusu za s = 0. To znači da je nova metoda razvijana s ciljem mogućnosti primjene na sva slabo propusna ležišta u svim '*pre*' i *'post-frac'* testovima na svim tipovima bušotina. Iz tog razloga je odabrani test porasta tlaka na višestruko frakturiranoj horizontalnoj bušotini u ekstremno slabo propusnom ležištu šejla u prethodnih šest koraka detaljno analiziran, kako bi se za buduću primjenu mogao iskoristi maksimalan broj zaključaka dobivenih tijekom istraživačke faze razvoja nove metode.

4.4.1. Efektivni radijus bušotine

Iznos efektivnog radijusa, r_w', odabrane VFHB je 641,7 m, a izračunat je prema jednadžbi (2.53), za koju prethodno treba odrediti nekoliko parametara. Najprije se računa bezdimenzionalni efektivni radijus, r_{wD}', prema jednadžbi (2.55). Za njegov izračun potrebna je vrijednost maksimalnog bezdimenzionalnog efektivnog radijusa, r'_{wDmax}, koja se može procijeniti iz dijagrama na slici 26. On je dan u odnosu na bezdimenzionalnu duljinu kanala bušotine, L_D, koja prema jednadžbi ($L_D = L/r_f$) iznosi 124,55. Za ovu vrijednost i za broj, N, od 14 poprečnih fraktura, maksimalni bezdimenzionalni efektivni radijus, r'_{wDmax}, je procijenjen na približno 60. Sada se mogu izračunati bezdimenzionalni efektivni radijus, r'_{wD}, prema jednadžbi (2.55):

$$r'_{wD} = \frac{r'_{wD\max}}{e^{\frac{h_D}{2C_f D^N}\left(\ln\frac{4A_f}{e^{\gamma}C_A f r_w^2}\right)}} = \frac{60}{e^{\frac{2}{2\times 20\times 14}\left(\ln\frac{4\times 11^2\times\pi}{e^{0,57722}\times 31,62\times 0,1^2}\right)}} = 58,335 \tag{4.16}$$

i efektivni radijus, r'_w, iz jednadžbe (2.53):

$$r'_w = r'_{wD}\times r_f = 58,355\times 11 = 641,7m \tag{4.17}$$

U izrazima (4.16) i (4.17) su uvrštene vrijednosti parametara iz tablice 2, a bezdimenzionalna debljina sloja, h_D, je izračunata iz jednadžbe ($h_D = h/r_f = 2$).

Kako bi se efektivni radijus, r'_w, mogao primijeniti za analizu testa porasta tlaka u programu Saphir, najprije je potrebno modificirati Bourdet log-log dijagram za slabo propusna ležišta, kao i jednadžbe za određivanje propusnosti u stimuliranim bušotinama ((4.20) i (4.28)), odakle slijede i prilagođene jednadžbe za vrijeme ((4.23) i (4.30)) i protok ((4.24) i (4.31)), koje se unose u softver.

4.4.2. Modificirani Bourdet log-log dijagram

Za prilagodbu metoda tipskih krivulja i derivacije tlaka sa slike 11, koju je originalno razvio Bourdet (1989), najprije je potrebno izmijeniti definicije parametara na koordinatama, kako bi ga se moglo primijeniti na slabo propusna ležišta. Stoga je prvo prilagođena apscisa, na kojoj se nalazi bezdimenzionalna grupa, t_D/C_D, a zatim ordinata, na kojoj su bezdimenzionalni tlak, p_D, i derivacija tlaka, dana kao umnožak, $(t_D/C_D)*p_D'$. Osim toga, krivulje na dijagramu više nisu funkcionalno ovisne o bezdimenzionalnoj grupi C_De^{2s}, jer je skin faktor izražen unutar efektivnog radijusa bušotine, r'_w, nego su prilagođene prema bezdimenzionalnoj konstanti skladištenja, C_D, slično Gringartenovoj metodi sa slike 10.

Skala apscise je na originalnom dijagramu u rasponu od 10^{-1} do 10^{4}, dok je u novoj metodi neophodan puno veći raspon u iznosu od 10^{-26} do 10^{30}, radi preglednijeg uvida u preklapanje s log-log dijagramima mjerenih podataka analiziranih testova porasta tlaka. Raspon skale ordinate dan je od vrijednosti 10^{-4} do 10^{5}, za razliku od originalnog dijagrama, gdje ova skala nešto užeg raspona, od 10^{-1} do 10^{2}. Krivulje bezdimenzionalne konstante skladištenja, C_D, imaju maksimalno mogući raspon vrijednosti od 10^{54} do 10^{-23}, a preklapaju se analogno opisanom postupku uz sliku 11. Iznos konstantne derivacije tlaka, odnosno umnoška $(t_D/C_D)*p_D'$ je u ovoj modifikaciji postavljen na tzv. etalonsku konstantu od 0,0005. To znači da je ovaj referentni iznos na modificiranom Bourdet log-log dijagramu spušten s originalne konstante od 0,5, koja se pokazala jedinstvenom za dobro propusna ležišta i to za područje radijalnog protoka testa porasta. Međutim, krivulje derivacija nisu prikazane na modificiranom dijagramu, jer se za razliku od originalne metode, ovdje samo odabire preklapanje krivulje, C_D, s krivuljama, Δp, na testu porasta tlaka. To znači da u ovom slučaju nije bilo moguće provesti dvostruku provjeru točnosti dodatnim preklapanjem krivulja derivacija modificiranog dijagrama, $(t_D/C_D)*p_D'$, i derivacija, $\Delta t*p'$, s dijagrama testa porasta. Sve bezdimenzionalne veličine računaju se prema jednadžbama: (2.28) za p_D, (2.11) za t_D i (2.17) za C_D. U njih je potrebno uvrstiti širok raspon fizikalnih svojstva slabo propusnog ležišta plina, pa su time obuhvaćeni i konkretni parametri iz tablice 2.

Konstruktivne veličine za izradu modificiranog dijagrama na slici 85 nalaze se u tablici u prilogu 2, koja obuhvaća 12 stupaca i 99 redaka. Vrijednosti parametara koje su uvrštavane za izračun veličina u pojedinim stupcima odabrane su tako da se dijagram može jedinstveno primijeniti u analizi testova porasta tlaka svih tipova bušotina za svako slabo propusno ležište. Prvi stupac obuhvaća proizvoljno odabrane vrijednosti vremena, t, u sekundama, jer ono ulazi u određivanje bezdimenzionalnog vremena t_D, prema jednadžbi (2.11). U sljedeća tri stupca su vrijednosti, t_{D1}, do, t_{D3}, u kojim se uzima raspon propusnosti stijene, k, od 10^{-15}, 10^{-18} do 10^{-21} m^2. To znači da se dijagram može primijeniti u analizi testova porasta tlaka za ležišta propusnosti od 1 mD do ekstremno slabo propusnih ležišta ranga 1 nD. S obzirom da u jednadžbu (2.11) ulazi i radijus bušotine, koji je u ovom slučaju efektivni, r_w', za njegov iznos su uzeti iznosi od 1, 10, 100 i 1000 m. Tako je primjerice u stupcu 4 za parametar, t_{D3}, uvršten radijus od 1000 m, a ostala svojstva ležišta i fluida su iz tablice 2, pa on iznosi:

$$t_{D3} = \frac{k}{\phi \mu c_t r_w'^2} = \frac{1\times10^{-21}}{0,1\times0,000015\times6,4\times10^{-8}\times1000^2}\times0,01 = 1,04\times10^{-17} \qquad (4.18)$$

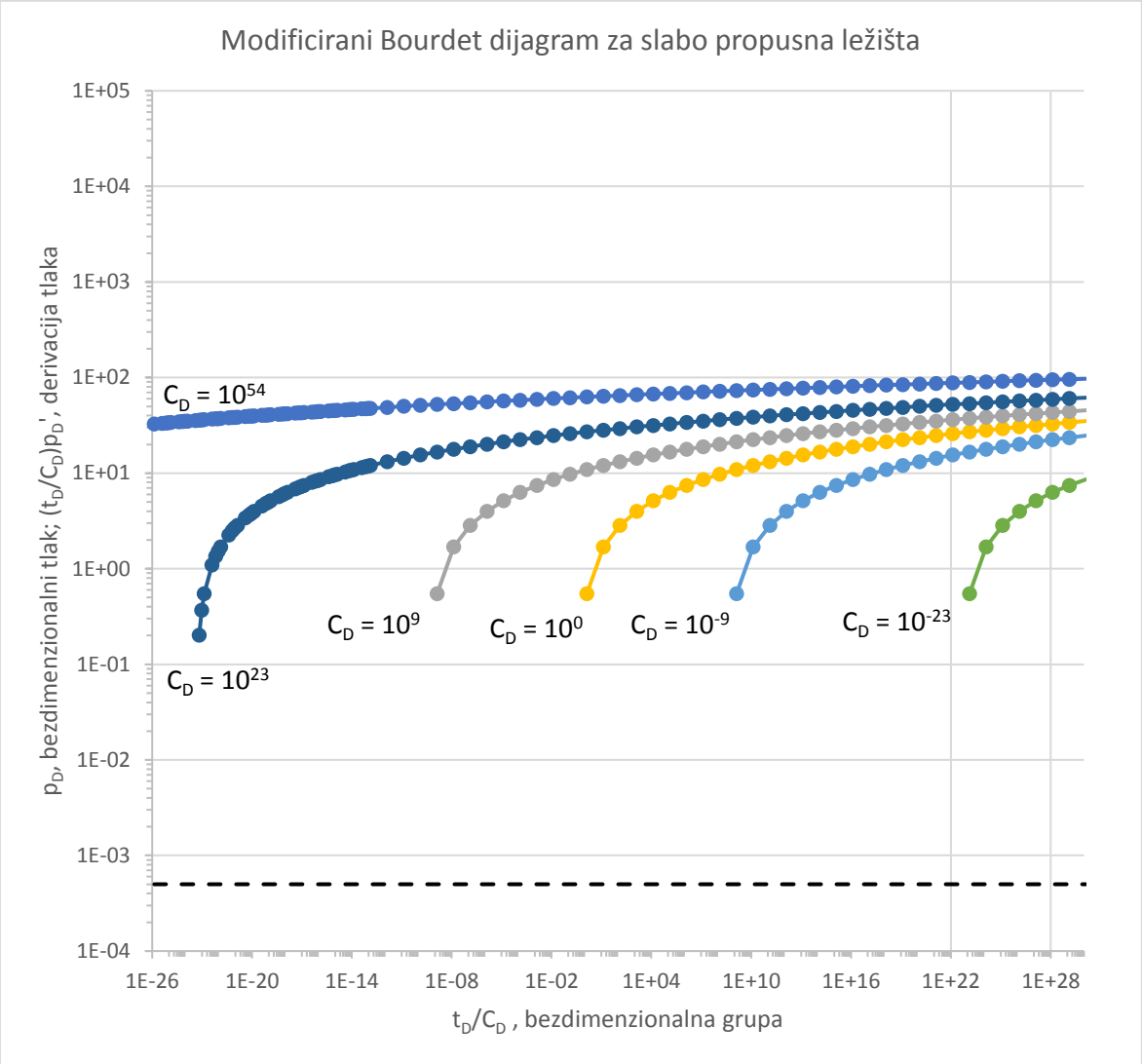
U sljedećem stupcu je jedinstveni ,t_D, koji obuhvaća sve vrijednosti od, t_{D1}, do, t_{D3}, koje se kombiniranjem svih propusnosti u navedenom rasponu i svih radijusa u odabranom rasponu, preklapaju po iznosima. Stoga je u prvom retku za, t_D, prva vrijednost od, t_{D3} (1,04E-17), a u posljednjem retku za, t_D, zadnja vrijednost za, t_{D1} (1,04E-21).

U sljedeća dva stupca su omjeri, t_D/C_{D1}, i, t_D/C_{D2}, nakon čega opet analogno slijedi jedinstveni raspon omjera, t_D/C_D. Za izračun bezdimenzionalne konstante skladištenja, C_D, prema jednadžbi (2.17), osim već spomenutog raspona vrijednosti za efektivni radijus, r_w', ovdje su uključeni i iznosi za debljinu ležišta od 1, 10, 100 i 200 m.

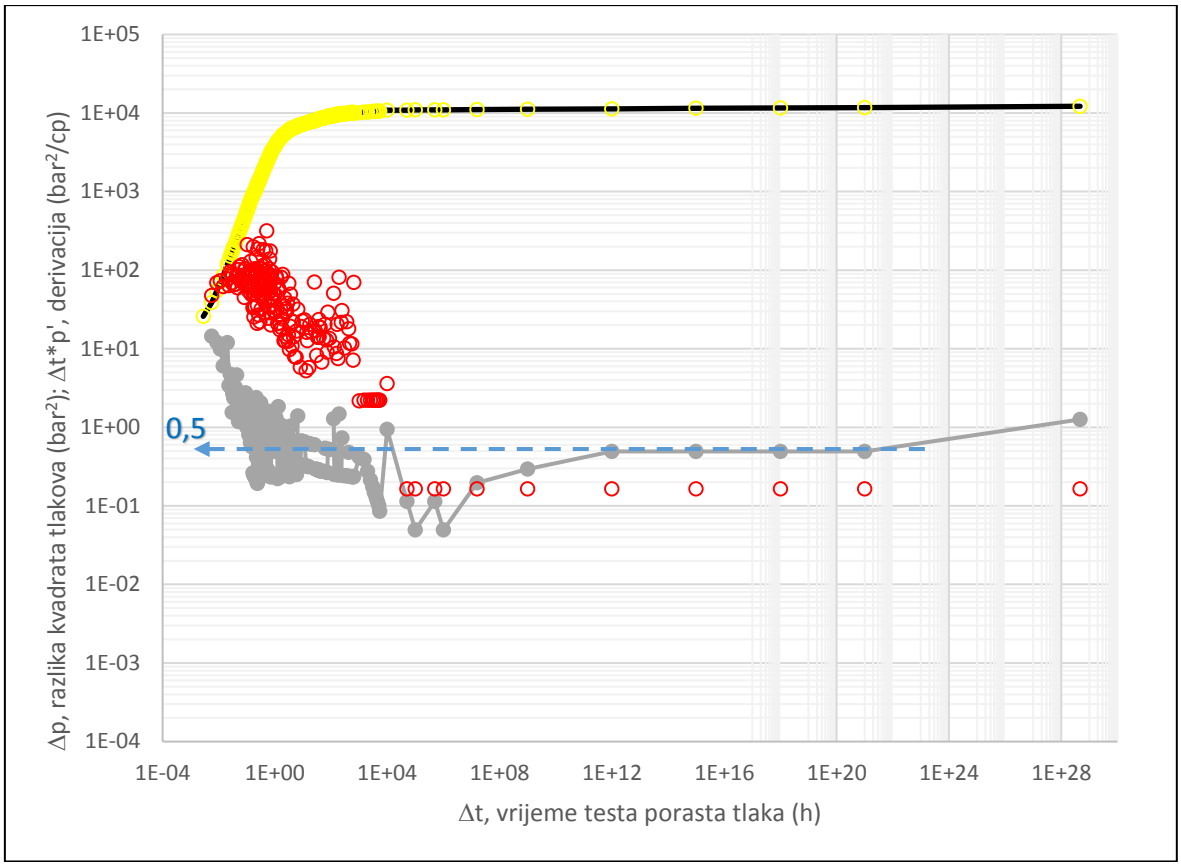
Zatim slijede stupci s proračunom bezdimenzionalnog tlaka, p_D, prema jednadžbi (2.26), u koju se umjesto člana za grupu, $ln\ C_De^{2s}$, uvrštava samo, $ln\ C_D$. Za primjer izračuna cijele krivulje bezdimenzionalanog tlaka, p_D, u prilogu 2 su odabrane tri vrijednosti bezdimenzonalnih konstanti skladištenja, C_D, od 1E+9, 1 i 1E-9. Na početku stupaca, tlakovi p_D imaju negativne vrijednosti, što znači da za te slučajeve slabo propusnih ležišta ne bi bilo odgovarajućeg rješenja propusnosti u rasponu odabranih vrijednosti pojedinih parametara, sve do vrijednosti apscise, t_D/C_D, koje su u tablici zatamnjene. To znači da su u posljednja tri stupca zatamnjene one pozitivne vrijednosti za, p_D, prema kojima su konstruirane krivulje za, C_D, na slici 85. Za razliku od toga, na istoj slici se može vidjeti da su za iznos krivulje, C_D, od 10^{54}, vrijednosti, p_D, na cijelom rasponu apscise postojeće tj. pozitivne.

Kod postupka preklapanja mjerenih podataka s tipskim krivuljama, najprije se konstantna derivacije tlaka s log-log dijagrama testa porasta tlaka (slika 86) postavlja na konstantu 0,0005 modificiranog dijagrama (slici 85). Međutim, ovdje je uveden dodatan uvjet metode kod pseudo-radijalnog protoka, da derivacija razlike tlakova izražena u obliku $\Delta t*p'$ (jednadžba 2.32), unutar pseudo-radijalnog protoka mora padati na vrijednost 0,5, slično originalnom Bourdet dijagramu. Kao što se vidi iz slike 86, taj oblik derivacije označen je sivom krivuljom. Ona je izražena jedinici bar^2/cp, koja je opće prihvaćena u analizi hidrodinamičkih mjerenja. To znači da je razliku kvadrata tlakova, Δp, prethodno potrebno podijeliti s umnoškom srednje vrijednosti viskoznosti, μ, i srednjeg popravnog faktora za plin, Z, jer se kod razvoja metode ne koristi pseudo-tlak $m(p)$, što je detaljno objašnjeno na početku 4. poglavlja. Iz iste slike se vidi da je i ovaj precizan uvjet ispunjen, tj. da derivacija unutar dijela područja pseudo-radijalnog protoka pada na vrijednost 0,5, pa postupak slijedi tako da se krivulja testa porasta tlaka horizontalno pomiče do podudaranja s odgovarajućom, C_D, krivuljom. Nakon toga se očitavaju podudarne točke s oba dijagrama, odakle se dobiva podudarni tlak $(p_D/\Delta p)_M$. Iz njega je moguće odrediti propusnost ležišta

prema jednadžbi (2.29), koju je kao posljednji korak razvoja nove metode, također potrebno modificirati, što je opisano u nastavku.



Slika 85: Modificirani Bourdet log-log dijagram za slabo propusna ležišta

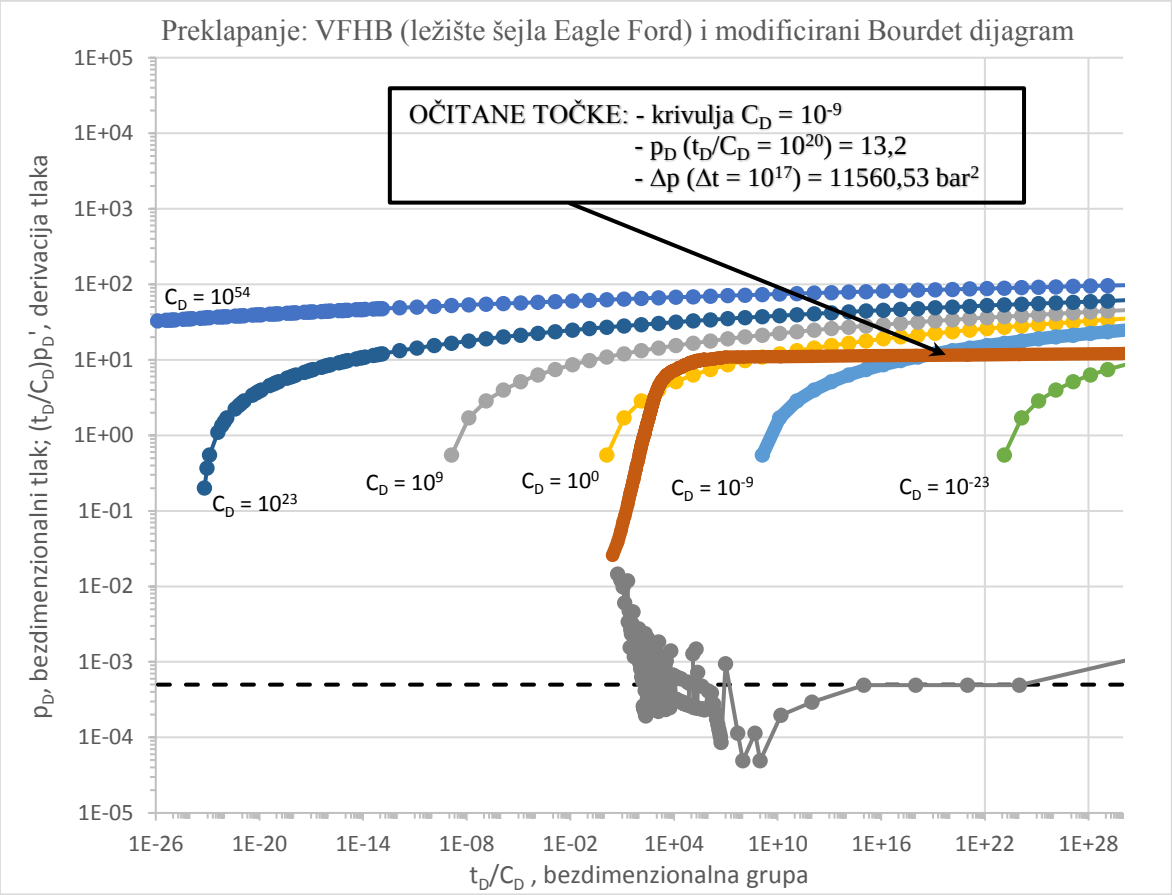


Slika 86: Test porasta tlaka i derivacija tlaka odabrane bušotine za razvoj nove metode

Preklapanjem testa porasta tlaka sa slike 86 preko modificiranog dijagrama na slici 85, kao najtočnija opcija je odabrana krivulja, C_D, iznosa 10^{-9}. S pomoću nje su očitane točke, p_D, i, Δp, čije vrijednosti su uvrštene u jednadžbu (4.19). Točnost preklapanja i veća pouzdanost primjene nove metode postiže se u slučaju kada se dio krivulje porasta što dulje pruža uzduž odabrane krivulje, C_D, i to u unutar vremenskog perioda trajanja pseudo-radijalnog protoka. U ovom slučaju preklapanje dvaju krivulja proteže se uzduž dva logaritamska ciklusa modificiranog dijagrama, i to od $t_D/C_D = 10^{18}$ do $t_D/C_D = 10^{20}$. Ukoliko je moguće odabrati nekoliko krivulja za preklapanje, odabire se ona koja je preklopljena istovremeno najdulje i najdublje unutar pseudo-radijalnog protoka. U ovom primjeru je vrijednost za, p_D, od 13,2 očitana na iznosu apscise od $t_D/C_D = 10^{20}$, a, Δp, na iznosu apscise od $\Delta t = 10^{17}$ h. Iz njih je izračunat podudarni tlak, koji je preračunat u jedinicu Pa^{-2}, jer se modificirani izraz za propusnost stijene u nastavku razvija u SI sustavu jedinica:

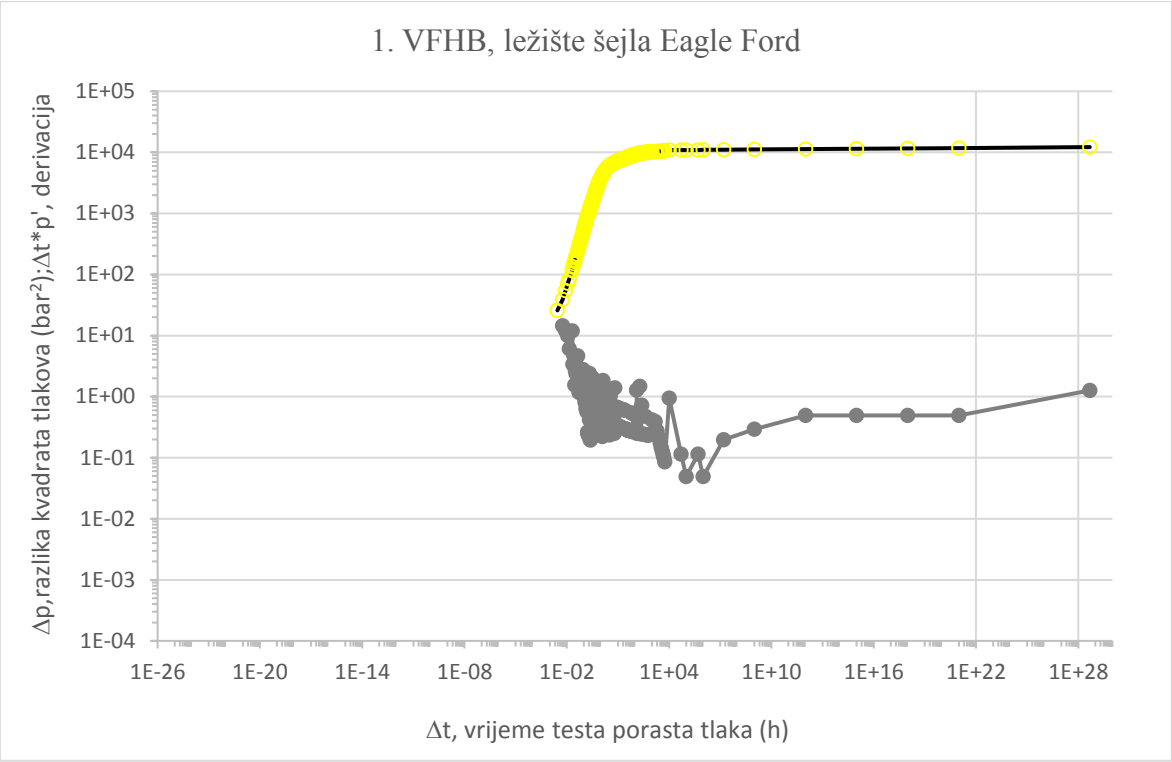
$$\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_M = \frac{13,2}{11560,53} bar^{-2} = 1,14\times10^{-13} Pa^{-2} \qquad (4.19)$$

Zajednički prikaz preklapanja obaju dijagrama za očitane točke s pomoću odabranih krivulja prikazan je na sljedećoj slici 87.



Slika 87: Preklapanja modificiranog dijagrama s analiziranim testom VFHB, ležište Eagle Ford

Za matematički adekvatno preklapanje dvaju dijagrama, bilo je potrebno prilagoditi logaritamske skale i njihove razmake na koordinatama analiziranog porasta tlaka za VFHB sa slike 86, što je prikazano na slici 88.



Slika 88: Konačan oblik analize 1. testa porasta VFHB za preklapanje s Bourdet dijagramom

Podudarni tlak, $(p_D/\Delta p)_M$, koji je iz očitanih vrijednosti sa slike 87 izračunat jednadžbom (4.19), uvršten je u jednadžbu (4.25) za određivanje propusnosti stijene, koja je izvedena u nastavku.

4.4.3. Modificirani izrazi za određivanje propusnosti stijene

Razvojem metode utvrđeno je da se modificirani log-log dijagram za analizu testa porasta tlaka slabo propusnih plinskih ležišta može koristiti jedino uz modifikaciju jednadžbe za određivanje propusnosti (2.29), prikazanu u tri koraka kroz jednadžbe (4.20), (4.21) i (4.22), dok se s pomoću jednadžbi (4.23) i (4.24), metoda može primijeniti i u programu Saphir, uz prethodno definiranje efektivnog radijusa bušotine, r_w'. Izvod modifikacije originalnog izraza za propusnost stijene kreće s početnim oblikom:

$$k = \frac{q}{10^6 \times 10^y} \times K_1 \times \left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_M = \frac{q}{10^6 \times 10^y} \times \frac{2 p_{sc} \mu Z T}{T_{sc} \pi h} \times \left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_M \tag{4.20}$$

gdje je s, K_1, označena konstanta koja uključuje svojstva pojedinog ležišta i bušotine. Kada se njena vrijednost pomnoži s podudarnim tlakom dobiva se izraz:

$$k = \frac{q}{10^6 \times 10^y} \times K_2 \times 10^{-n} \quad (4.21)$$

u kojem je ustanovljeno da vrijednost umnoška K_2x10^{-n} treba usporediti s iznosom od $1x10^{-15}$ m^2, koji odgovara propusnosti od 1 mD, odnosno graničnoj vrijednosti slabo propusnog plinskog ležišta. Ova usporedba vrijednosti izražena je s pomoću uvjeta za iznos potencije *y* u jednadžbi (4.20), definiranog kao:

$$K_2 \times 10^{-n} \leq 1 \times 10^{-15}, \text{ y = n-15} \quad (4.22)$$

Ako se radi o ekstremno slabo propusnom ležištu u kojem bi umnožak K_2x10^{-n} bio reda veličine K_2x10^{-18}, tada bi iznos potencije *y* bio 3, dok bi za veći iznos umnoška K_2x10^{-n} primjerice od K_2x10^{-13}, iznos potencije *y* bio negativan, odnosno -2.

U skladu s jednadžbom (4.20) razvijeni su i novi ulazni izrazi za vrijeme konstantnog protoka, t_p, i za iznos konstantnog protoka, q_p, kod primjene metode u programu Saphir. S obzirom da se u navedenoj jednadžbi stvarni protok dijeli s neovisnom konstantnom u nazivniku jednadžbe (4.20), koja iznosi 10^6x10^y, stvarno vrijeme konstantnog protoka potrebno je pomnožiti s istom konstantom. Na taj način umnožak protoka i vremena i dalje ostao isti ($t_p*q_p = t_{p(stvarni)}*q_{p(stvarni)}$), ali je vrijeme u jednadžbi (4.23) povećano, čime je stvoren i preduvjet za gotovo sigurno postizanje uvjeta pseudo-radijalnog protoka prije zatvaranje bušotine, čija nužnost je pojašnjena ranije. Stoga su ove ulazne jednadžbe za program Saphir definirane na sljedeći način:

$$t_p = t_{p(stvarni)} \times \left(10^6 \times 10^y\right) \quad (4.23)$$

i

$$q_p = \frac{q_{(stvarni)}}{10^6 \times 10^y} \quad (4.24)$$

s time da se u softveru vrijeme uvrštava u satima, a protok u m^3/d.

Sada je sve vrijednosti za odabranu bušotinu na ležištu Eagle Ford (tablica 2) moguće uvrstiti u jednadžbu (4.20) i s pomoću podudarnog tlaka iz jednadžbe (4.19) izračunati propusnost stijene prema novom modificiranom izrazu:

$$k = \frac{q}{10^6 \times 10^y} \times K_1 \times \left(\frac{p_D}{\Delta p} \right)_M = \frac{q}{10^6 \times 10^y} \times \frac{2 \cdot 101325 \cdot 0,000015 \cdot 0,8 \cdot 325,85}{283,15 \cdot 3,14 \cdot 22} \times 1,14 \cdot 10^{-13} =$$

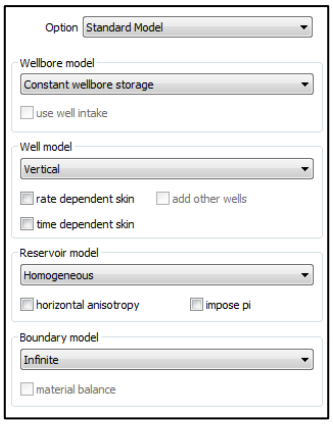
$$= \frac{q}{10^6 \times 10^y} \times 0,04122 \times 1,14 \cdot 10^{-13} = \frac{q}{10^6 \times 10^y} \times 4,7 \cdot 10^{-15} = \frac{965}{10^6} \times 4,7 \cdot 10^{-15} = \quad (4.25)$$

$$= 4,546 \cdot 10^{-18} m^2 \approx 0,005 mD$$

U prethodnom proračunu se vidi da nakon uvrštavanja svih vrijednosti, umnožak $K_2 x 10^{-n}$ iz jednadžbe (4.21), iznosi 4,7E-15, pa je u nastavku prema jednadžbi (4.22) uvrštena vrijednost potencije od: y = 15-15 = 0. Dobiveni rezultat je 0,005 mD, što je gotovo identično propusnosti iz rada Lougheeda i suradnika, koja odgovara laboratorijski određenoj vrijednosti propusnosti stijene od 0,006 mD. Ovime je dokazana glavna hipoteza rada da se analizom testa porasta tlaka u bušotinama slabo propusnih ležišta može pouzdano procijeniti propusnost stijene, a teza je potvrđena i na ostalim testovima u 5. poglavlju. Odavde slijedi i dokaz druge hipoteze da se konvencionalne metode za analizu testa porasta tlaka mogu prilagoditi za primjenu u nekonvencionalnim plinskim ležištima u svrhu određivanja potrebnog trajanja testa porasta. Isti primjer analiziran je u nastavku primjenom nove metode u softveru, gdje su također dokazane iste hipoteze rada.

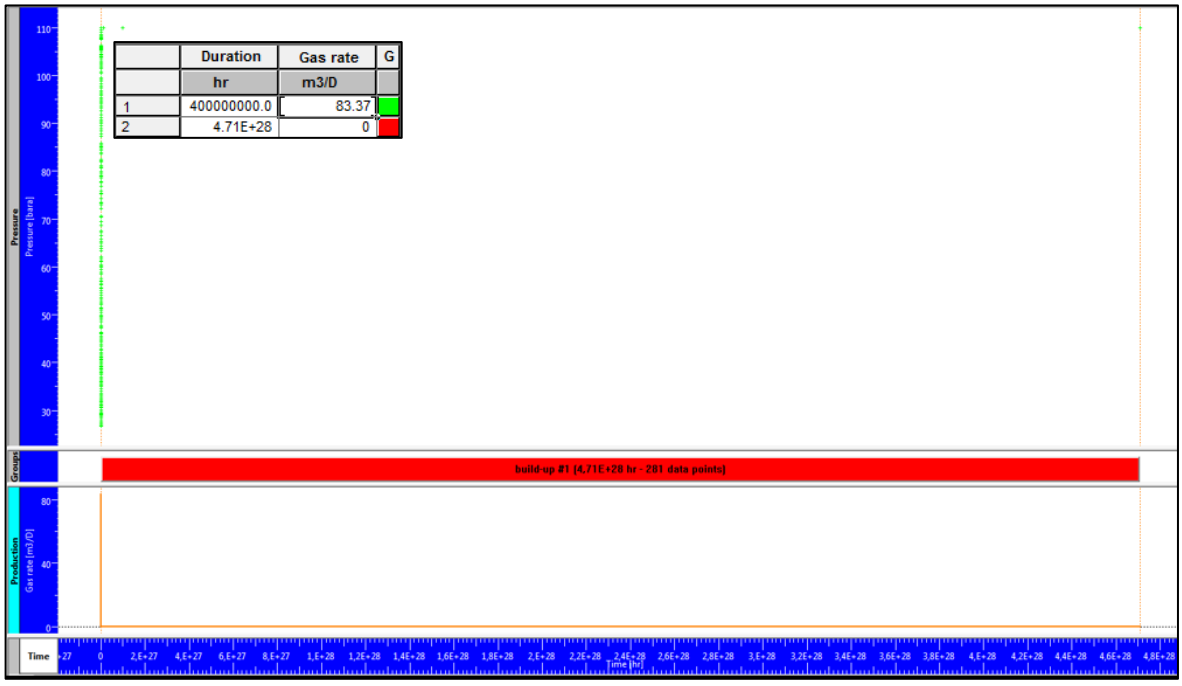
4.4.4. Prilagodba nove metode za primjenu u programu Saphir

Na slici 89 su isti ulazni podaci, kao i u primjeru za odabranu bušotinu u odlomku 3.3 na slici 41, osim što se ona ovdje analizira kao vertikalna s efektivnim radijusom, te je test porasta ekstrapoliran do početnog ležišnog tlaka s vremenom trajanja do 4,71E+28 sati (slika 90). Uvođenje efektivnog radijusa kod analize testa porasta za pseudo-radijalni protok, gdje se višestruko frakturirana horizontalna bušotina analizira kao vertikalna, je prva modifikacija nove metode, kojom se omogućuje primjena programa Saphir i u slabo propusnim ležištima. Ovdje se, nažalost, dolazi i do prvog problema u programu, jer se kod modela za vertikalnu bušotinu kao maksimalna vrijednost radijusa može uvrstiti iznos do 100 m. To se u budućnosti softverski lako može povećati i na 1000 m, ukoliko bi u Kappi ovo novo rješenje bilo prihvaćeno, jer prije uvođenja nove metode nije bilo niti potrebe za ovako visokim iznosom radijusa. No, bez obzira što se ovdje morala uvrstiti manja vrijednost efektivnog radijusa, dobiveni rezultat za propusnost stijene od 4,3E-18 m^2 na slici 92, ipak potvrđuje uspješnu prilagodbu metode za primjenu u programu Saphir.



Slika 89: Ulazni podaci o bušotini i ležištu za primjenu nove metode u programu Saphir s pomoću efektivnog radijusa bušotine, ležište Eagle Ford

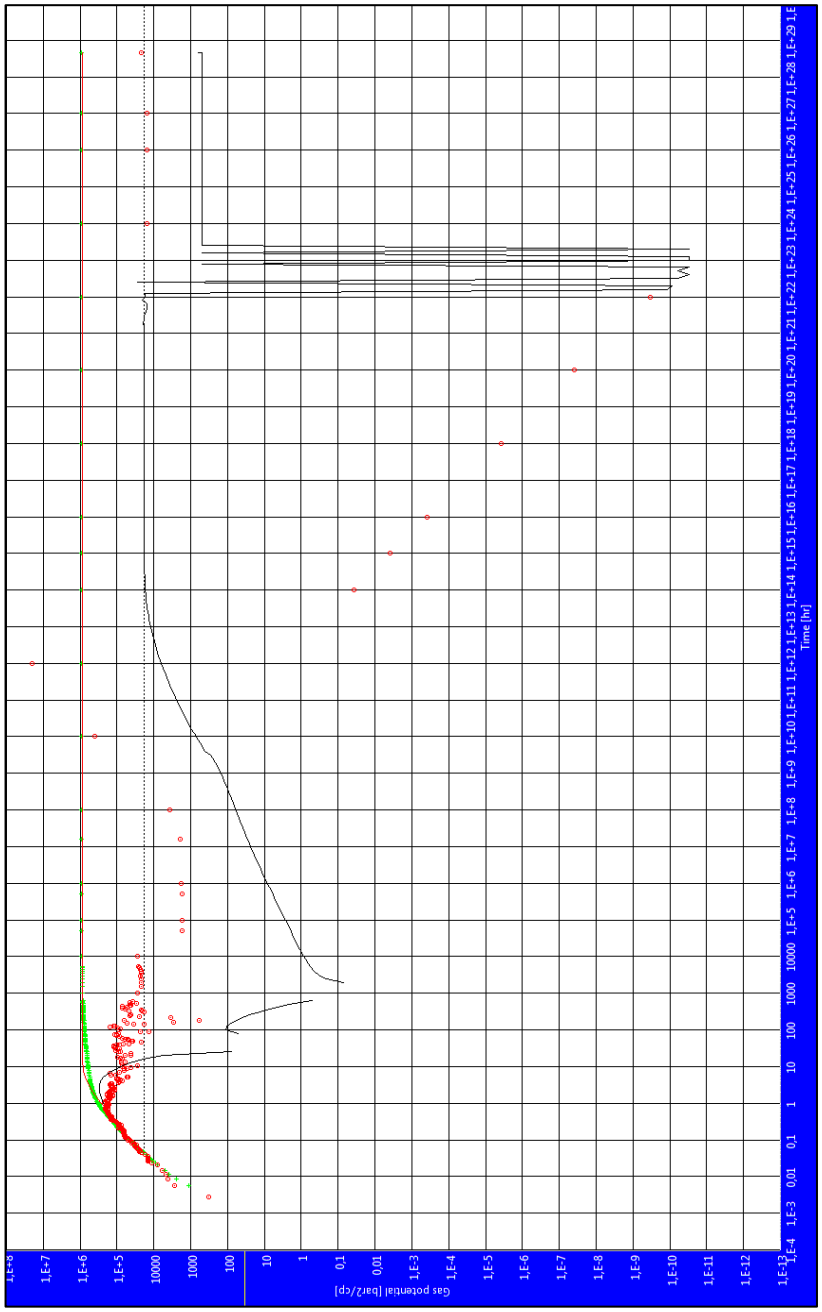
Sljedeća modifikacija ulaznih podataka testa porasta kod primjene nove metode na program Saphir, odnosi se na vrijeme konstantne proizvodnje prije zatvaranja bušotine, t_p, i na iznos konstantnog protoka, q_p, koji se određuju jednadžbama (4.23) i (4.24). Njihovi iznosi od 4,71E+8 sati i 83,37 m^3/d prikazani su na slici 90. Kao što je pojašnjeno prethodno, ovim korakom se, osim postizanja pseudo-radijalnog protoka u samom testu porasta, simulira pseudo-radijalni oblik protoka i u samoj bušotini prije zatvaranja, što je utjecalo na povećanje točnosti rezultata, pa time i na pouzdanost primjene nove metode i u softveru.



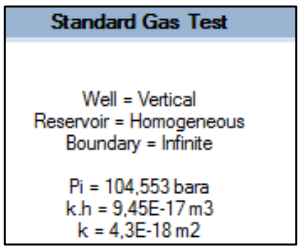
Slika 90: *'History plot'* testa porasta tlaka za primjenu nove metode u programu Saphir s pomoću modificiranih parametara protoka, q_p, i vremena, t_p, ležište Eagle Ford

S pomoću uvedenih modifikacija nove metode, program je uspio prepoznati pseudo-radijalni protok na log-log dijagramu sa slike 91 i izračunati propusnost u iznosu od 4,3E-18 m^2 tj. 0,004 mD (slika 92), što je vrlo blizu vrijednosti određenoj novom metodom od 0,005 mD. Usporedbom ovog dijagrama i log-log dijagrama dobivenog kod razvoja metode na slici 86, ključno je za uvidjeti da program nije odredio početak pseudo-radijalnog protoka u istom vremenu, za što postoje logička pojašnjenja. Kao prvo, programom se cijela krivulja porasta tlaka interpretira s modifikacijom pomaka vremena i promjene količine protoka prije zatvaranja bušotine, jer se ustanovilo da je to jedini način ispunjavanja neophodnog uvjeta za primjenu rješenja jednadžbe difuzije za neograničeno ležište, a na kojoj se bazira i program. Radi toga je neminovno došlo i do razlika u određivanju iznosa derivacije tlaka do trenutka pojave pseudo-radijalnog protoka na ovom dijagramu. Stoga se odavde može zaključiti da je nebitno u kojem vremenu trajanja testa porasta tlaka bi točno došlo do pseudo-radijalnog protoka, već je za točan izračun propusnosti jedino bitno da do ovog oblika dođe!

Iako ovdje nisu analizirani i ostali rezultati testa porasta (slika 92), kao što je primjerice početni tlak od 104,5 bara, koji je niži od stvarnog za 9 bara, ipak se može zaključiti da je postignut ključni cilj, a to je potvrda točnosti procijenjene vrijednosti propusnosti stijene, koju prije uvođenja nove metode nije bilo moguće pouzdano odrediti programom Saphir. Međutim, ovdje treba ponovno napomenuti da je ovaj rezultat dobiven s efektivnim radijusom od 100 m, a ne sa stvarnom vrijednošću od 641,7 m. Kako se ona određuje iz vrlo složenih jednadžbi (4.16) i (4.17), u koje je uključeno desetak ostalih parametara ležišta i bušotine, nije moguće zaključiti u kojoj mjeri bi točan unos radijusa utjecao na rezultate, ali se pretpostavlja da bi red veličine propusnosti ostao isti, u rangu od nekoliko mikro Darcyja (1μD = 0,001 mD = 1E-18 m^2).



Slika 91: Log-log dijagram analize testa porasta tlaka za primjenu nove metode u programu Saphir do krajnje ekstrapoliranog tlaka, ležište Eagle Ford



Slika 92: Rezultati analize testa porasta tlaka primjenom nove metode za određivanje propusnosti u programu Saphir, ležište Eagle Ford

5. PRIMJENA METODE U OSTALIM SLABO PROPUSNIM LEŽIŠTIMA

U istraživačkoj fazi je analizirana nekolicina testova porasta tlakova iz slabo propusnih plinskih ležišta pješčenjaka i šejlova (Virues et al., 2016; Kam et al., 2015; Sun i Schechter, 2015; Denney, 2014; National Energy Board, 2011; Zeng i Zhao, 2007; itd). Nažalost, u većini radova nije objavljen dovoljan broj podataka o svojstvima ležišta i bušotina, kao niti o samim testovima, kako bi se nova metoda mogla pouzdano provesti u svim svojim segmentima. Međutim, razvijena metoda za određivanje propusnosti stijene kratkim testovima porasta tlaka u ostalim slabo propusnim plinskim ležištima je ipak uspješno dokazana na četiri stimulirane bušotine, odnosno na četiri testa porasta tlaka. Ovi primjeri su sistematizirano prikazani u tablici 25. Za razliku od razvoja metode, gdje je kao prvi analiziran test u VFHB šejla, nova metoda je najprije primijenjena u frakturiranoj bušotini (FB) pješčenjaka i to upravo za primjer iz rada Bahramija i suradnika, opisanog u odlomku 3.2. Time je dokazano da metoda vrijedi i u ležištima slabo propusnih pješčenjaka i za frakturirane bušotine. Zatim je za isti slučaj FB u pješčenjaku analiziran još jedan test porasta tlaka objavljen u radu Garcie i suradnika (2006), te je metoda po treći puta uspješno provedena. Konačno, kao četvrti primjer odabrano je ponovno ležište slabo propusnog pješčenjaka, ali s testom u VFHB (Yuan et al., 2013), kako bi se uvidjelo vrijedi li izvedena metoda za VFHB samo u ležištima šejlova ili se može primijeniti i u pješčenjacima.

Tablica 25: Testovi porasta tlaka za primjenu nove metode

Broj testa	Tip bušotine	Vrsta ležišta	Naziv ležišta	Država
1	VFHB	Šejl	Eagle Ford	Texas, SAD
2	FB	Pješčenjak	Perth Basin	Australija
3	FB	Pješčenjak	Montney	Alberta, Kanada
4	VFHB	Pješčenjak	Changqing	Kina

5.1. Testovi porasta tlaka u frakturiranim bušotinama (FB)

5.1.1. Primjena nove metode na ležištu Perth Basin, Australija

Analiza testa porasta tlaka napravljena je prema ulaznim podacima o frakturiranoj bušotini u ležištu pješčenjaka iz tablice 26 (Bahrami et al., 2013). Cijela primjenjivost metode na ostalim testovima porasta temelji se na usporedbi s opisanim tzv. etalon primjerom za VFHB u šejlu. Stoga se u sljedećoj tablici, osim ključnih razlika da se radi o frakturiranoj bušotini u pješčenjaku, kao prvo uočava razlika o izrazito višem ležišnom tlaku

od gotovo 350 bara, u odnosu na prethodnih svega 113 bara. Ova činjenica značajno je utjecala na prilagodbu nove metode u ovom ležištu.

Tablica 26: Osnovna svojstva ležišta Perth Basin, bušotine i 2. testa porasta tlaka

Naziv ležišta i broj testa porasta:	**Perth Basin, 2. test**	
Svojstva ležišta i FB	Iznos	Jedinice
Radijus bušotine, r_w	0,0762	m
Efektivna debljina ležišta, h	112	m
Početni ležišni tlak, p_i	344,74	bar
Ležišna temperatura, T_R	93,33	^oC
Šupljikavost ležišne stijene, ϕ	0,096	dio cijelog
Ukupna stlačivost, c_t	1,11E-8	Pa^{-1}
Dinamička viskoznost plina, μ	1,2E-5	Pa·s
Z faktor plina, -	0,8	-
Poluduljina frakture, x_f	22,9	m
Vodljivost frakture, C_f	30,5E-15	$m^2 \cdot m$
Vrijeme testa porasta tlaka, Δt	220	h
Vrijeme konstantnog protoka, t_p	12 000	h
Konstantan protok plina	42393,6	m^3/dan

Originalni test porasta tlaka iz ovog rada na ordinati je dan parametrom pseudo-tlaka *m(p)* u jedinici psi^2/cp, pa je prema novoj metodi, ordinata najprije preračunata u razliku kvadrata tlakova, *Δp*, izraženu u jedinici bar^2. U tablici 27 su skraćeno prikazani karakteristični retci i stupci s ključnim točkama krivulje porasta tlaka, prikazane na slici 93.

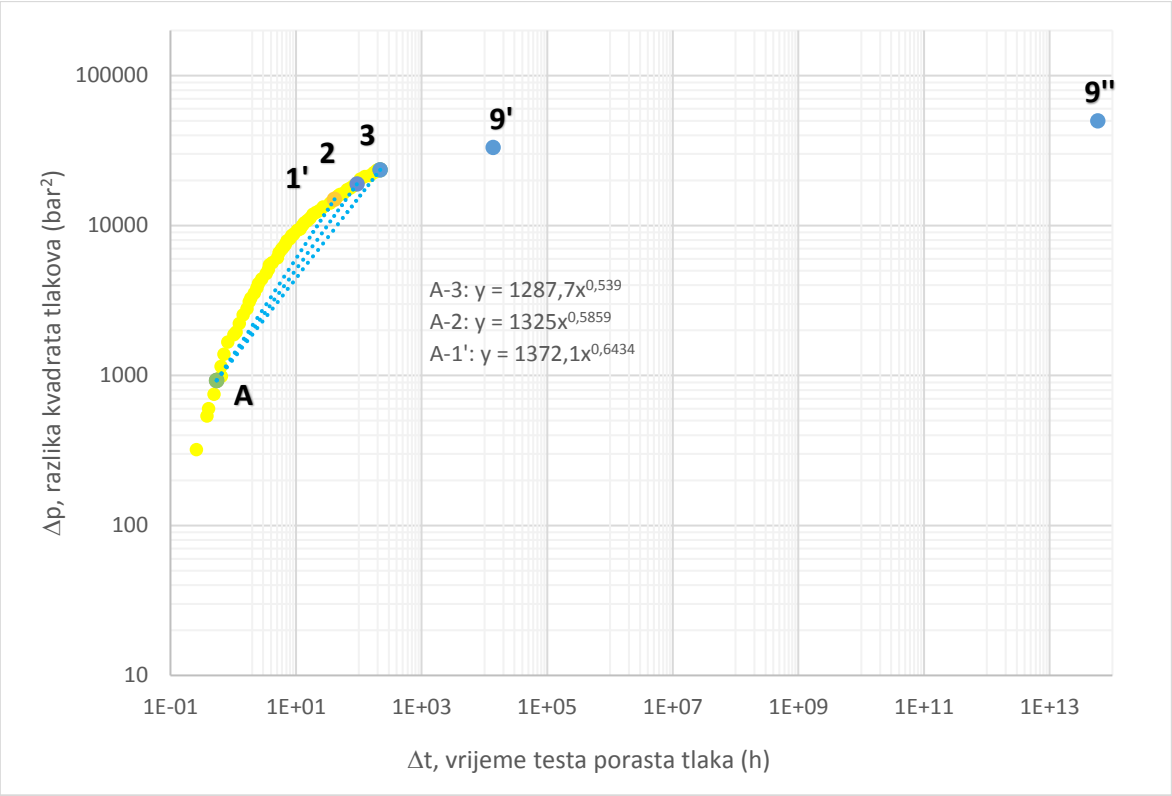
Tablica 27: Test porasta tlaka, ležište Perth Basin

točke	**Δt (h)**	**m(p) (psi^2/cp)**	**m(p) (bar^2/cp)**	**p (bar)**	**p^2 (bar^2)**	**Δp (bar^2)**
	0,13	11230764,80	53386,78	18,05	325,93	0,00
	0,26	22239859,08	105719,83	25,41	645,42	319,49
A	0,54	43198603,44	205349,72	35,41	1253,66	927,73
1'	41,05	527348012,90	2506811,81	123,71	15304,09	14978,16
2	94,00	665347047,04	3162806,71	138,96	19308,93	18983,01
3	220,00	823406195,14	3914159,76	154,58	23895,95	23570,02
9'	1,47E+4			(185)		34067
9"	5,89E+13			(231)		49919,80

U 5. stupcu tablice ostavljen je mjereni tlak *p* u barima, pa je i ovdje jasno uočljiva razlika da je tlak kroz 220 sati mjerenja porastao s 18 bara na 154 bara, odnosno za 136 bara, dok je u etalonskom primjeru tijekom trostruko duljeg perioda mjerenja od 643 sata, prirast bio 77 bara, što je gotovo dva puta manje. To se odrazilo i na izgled same krivulje porasta, koja, za razliku od VFHB, ovdje puno brže raste, pa je u samoj tablici 27 već ukazan rezultat zadnje moguće ekstrapolirane točke 9". Ona leži na tlaku od približno 231 bar. To znači da krivulja porasta nije ekstrapolirana do početnog ležišnog tlaka i točke 9"', kao kod etalonskog primjera, iz razloga što je ustanovljeno da bi nakon trajanja testa od 5,89E+13 sati nastupilo polu-stacionarno stanje u bušotini. Međutim, dodatni značaj primjene nove metode u ovom primjeru je, ne samo da se može primijeniti i na frakturirane bušotine i na ležišta slabo propusnih pješčenjaka, već da se njome može odrediti pojava pseudo-radijalnog protoka, i u slučajevima kada nakon njega dolazi do polu-stacionarnog stanja. Za razliku od toga, u etalonskom primjeru, granice ležišta ne bi bile dostignute skroz do potpunog izjednačavanja tlaka u ležištu, kao što je prikazano na slici 84.

Nadalje, prema prvom koraku metode, točka 2 je također postavljena na približno 100 sati, odnosno na pretpostavku četverodnevnog mjerenja, a točka 3 je na završetku testa, koji u ovom slučaju ne traje mjesec dana, nego 220 sati ili približno 9 dana. Na slici 93 je osim ključnih točki, prikazan i drugi korak metode, odnosno točka A na periodu skladištenja, s pomoćnim točkama za određivanje nagiba pravaca, m_i.

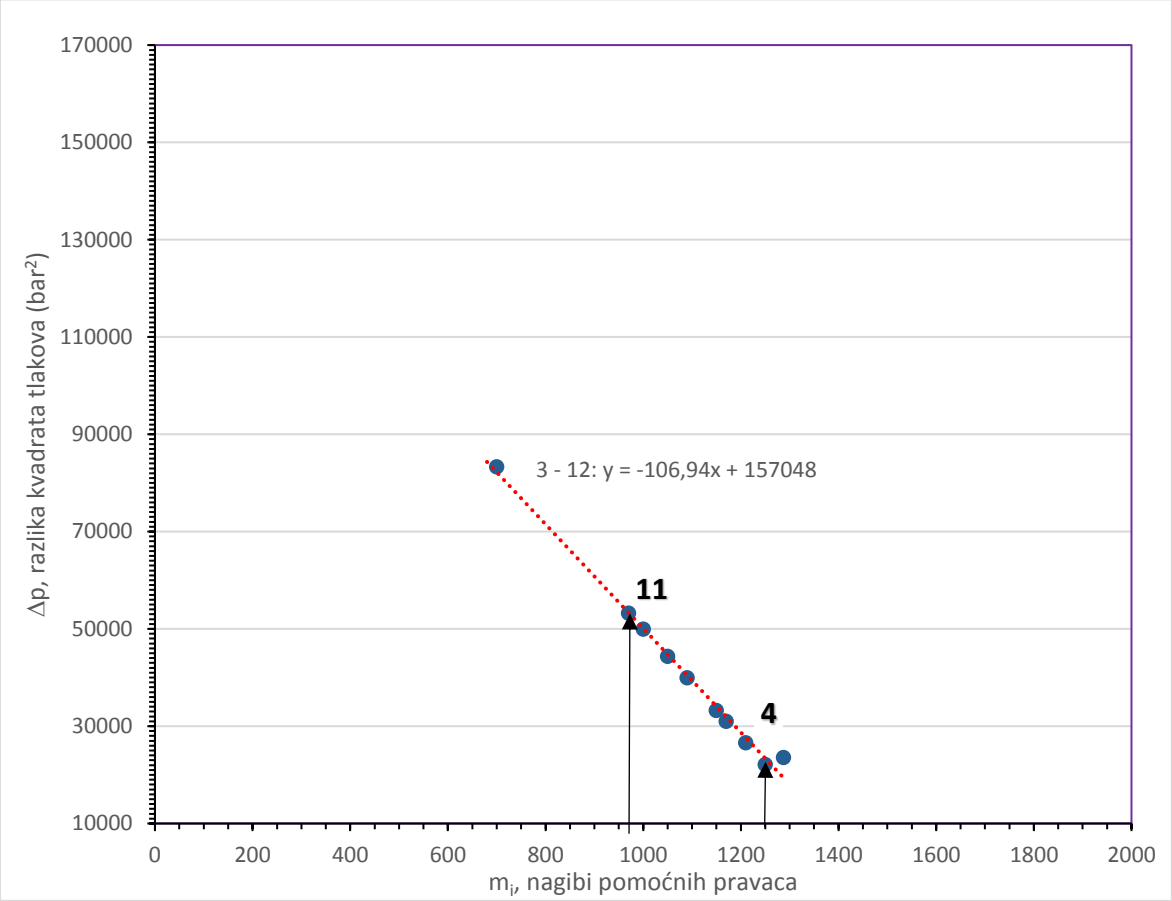
S obzirom na brži porast krivulje u odnosu na etalonski primjer, ovdje su odabrana tri nagiba za, *m*, koja su kao treći korak u primjeni nove metode preneseni na lin-lin dijagram, iz kojih je na slici 94, prema opisanom postupku izvedena konačna jednadžba ($y_{3\text{-}12}$).



Slika 93: Nagibi pravaca od točke A do odabranih točaka na krivulji porasta, ležište Perth Basin

U određivanju ekstrapoliranih točaka 9' i 9" primijenjena je sličnost s postupkom u trećem koraku etalonskog primjera. Prema opisanoj korekciji parametara kod definiranja jednadžbe za određivanje nagiba, m_i, u tzv. nepoznatom području trajanja testa, ustanovljeno je da se s pomoću jednadžbi (4.12) i (4.13) za nulti nagib od $m = 0$ ne može odrediti vrijeme, Δt, u kojem bi se postigao početni ležišni tlak, tj. točka 9'". Razlog je što krivulja porasta tlaka nakon prestanka pseudo-radijalnog protoka više ne slijedi ovu zakonitost, jer u polu-stacionarnom stanju mijenja nagib svog porasta. No, s pomoću ovih zakonitosti nove metode uspješno su određeni nagibi, m_i, do točke 9", tako što je najprije analogno određena jednadžba ovisnosti nagiba, m_i, o, Δp , od točki 1' do 3, koji su određeni na slici 93. Oni imaju vrijednosti od 1372 do 1287, a njihova jednadžba je $y_{1'-3} = -101{,}08*x + 153436$. S obzirom na nagliji porast krivulje u kraćem vremenu, ovdje je uzet i manji broj međutočki za određivanje jednadžbe nego kod etalonskog primjera. Zatim su parametri a i y_0 iz jednadžbe $y_{1'-3}$, analogno metodi, uvećani za 10% i 5%, te je povučen novi pravac, čija jednadžba je $y_{1'-6} = -111{,}19*x + 161108$. Pritom je točka 6 (tablica 28) odabrana na nagibu $m = 1170$, jer bi se sukladno etalonskom primjeru moglo pretpostaviti da bi otprilike do ovog nagiba trajalo mjerenje tlaka od mjesec dana, koje je kod ležišta Eagle Ford bilo označeno

rednim brojem 8 (tablice 7, 9 i 11). Sljedeći dio procedure je isključiti utjecaje početnih nagiba ($y_{1'-3}$) i temeljem jednadžbe ($y_{1'-6}$) postaviti novu jednadžbu za konačno očitanje nagiba u nepoznatom području krivulje nakon točke 3 (y_{3-}). Kada su se analogno etalonskom postupku, po pravcu jednadžbe ($y_{1'-6}$) očitale točke za nagibe m_i od točke 3 skroz do iznosa m = 970 (točka 11), dobivena je konačna jednadžba (y_{3-12}), koja je prikazana na slici 94.



Slika 94: Nagibi pravaca u odnosu na razliku kvadrata tlakova, ležište Perth Basin

Očitanja tlakova sa slike 94 za pozicije nagiba, m_i, od točki 3 do 12 dane su u tablici 28, s time da se točka 11 odnosi na posljednju točku trajanja pseudo-radijalnog oblika protoka (9"), jer je ovom metodom ujedno otkriven i način određivanja početka polu-stacionarnog stanja u ležištu. Naime, kod primjene jednadžbe (4.12) za određivanje iznosa potencije, n, neophodne za izračun vremena, Δt, u kojem bi bio postignut očitani tlak, Δp, za pojedini nagib, m, u nepoznatom području testa porasta, ustanovljeno je da na poziciji 12 iznos potencije, n postaje negativan. To znači da dolazi do promjene nagiba cijele krivulje porasta, jer iz ove zakonitosti više nije moguće odrediti vrijeme, Δt, prema jednadžbi (4.13).

U tablici 29 su za svaki očitani nagib izračunati pripadajući iznosi potencije, *n*, kao i vremena, *Δt*, za očitane razlike kvadrate tlakova, *Δp* do točke 11, nakon čega, *n*, postaje negativan tj. mijenja se nagib cijele krivulje porasta tlaka.

Tablica 28: Izračun razlike kvadrata tlakova za pojedine nagibe, m_i, ležište Perth Basin

točke	**m_i**	**Δp (bar^2)**
3	1287,7	19341,36
4	1250	23373
5	1210	27650,6
6	1170	31928,2
7 (9')	1150	34067
8	1090	40483,4
9	1050	44761
10	1000	50108
11 (9'')	970	53316,2
12	700	82190

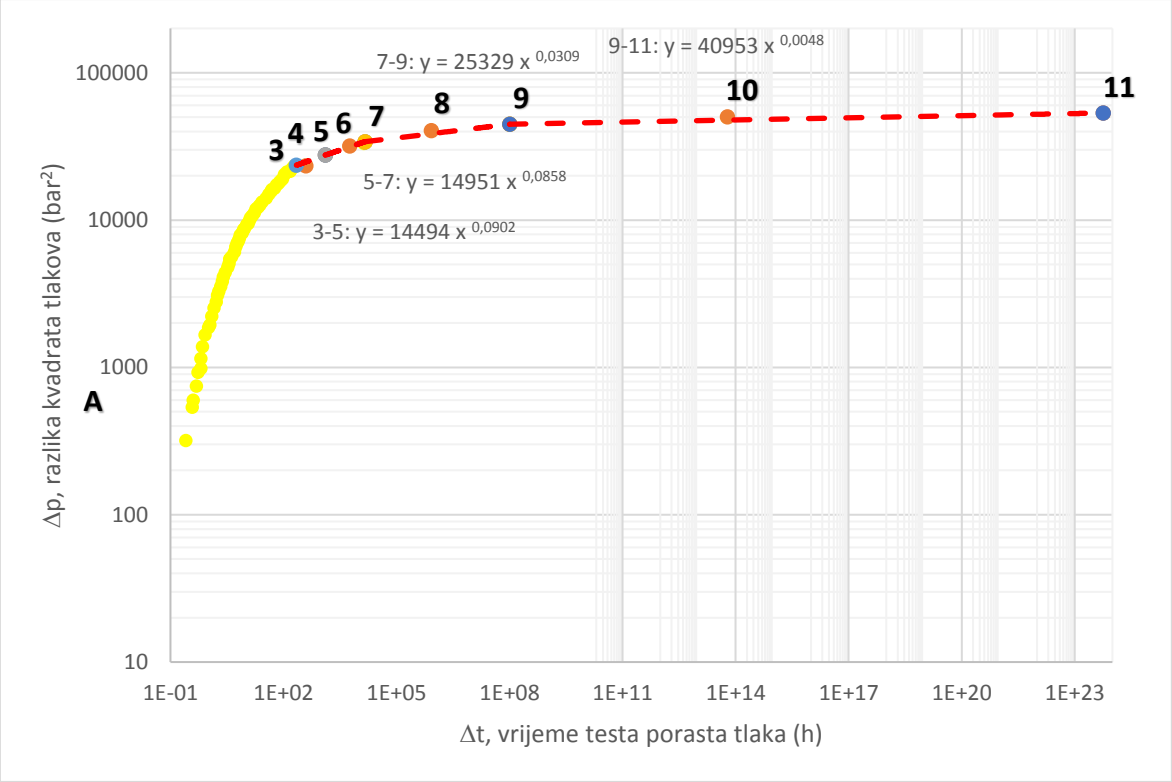
Tablica 29: Izračun iznosa potencije, *n*, i vremena trajanja testa porasta, *Δt*, za pojedine tlakove, ležište Perth Basin

točke	**n**	**Δt (h)**	**Δp (bar^2)**
4	0,490205	393,0384	23373
5	0,436732	1292,887	27650,6
6	0,381462	5813,43	31928,2
7 (9')	0,353114	14709,25	34067
8	0,265015	838753,9	40483,4
9	0,203545	1,02E+08	44761
10	0,123327	6,08E+13	50108
11 (9'')	0,073248	5,7E+23	53316,2
12	-0,46309		

U obje tablice je radi nešto različitog pristupa u određivanju ekstrapoliranih točaka u odnosu na etalonski primjer, odabran veći broj nagiba, m_i, za očitanja tlakova, kako bi konačni rezultat eventualnog pojavljivanja pseudo-radijalnog protoka bio što pouzdanije određen.

U sljedećim koracima metode (četvrti i peti) je prema ovim ekstrapoliranim točkama, segment po segment, optimalno ekstrapolirana cjelokupna krivulja porasta tlaka, sve do točke 9".

Na slici 95 je prikazano određivanje jednadžbi potencije za odabrane segmente krivulje porasta, prema kojima je u tablici 30 dana njena optimalna ekstrapolacija do točke 11. Ona u ovom slučaju odgovara spomenutoj točki 9", nakon koje bi krivulja porasta ušla u polu-stacionarno stanje, te bi se njen nagib pri porastu tlaka promijenio, a što se uočava na krivulji njene derivacije (slika 96).



Slika 95: Segmenti za optimalnu ekstrapolaciju krivulje porasta tlaka, ležište Perth Basin

U tablici 30 su između ekstrapoliranih točaka dodane točke D1 do D19, kako bi se u sljedećem i posljednjem tj. šestom koraku ovog dijela primjene nove metode, mogao što točnije postaviti i tijek derivacije krivulje porasta, prikazane na slici 96. Ona je odmah dana u obliku potrebnom za preklapanje s modificiranim Bourdet log-log dijagramom, što je objašnjeno uz sliku 88.

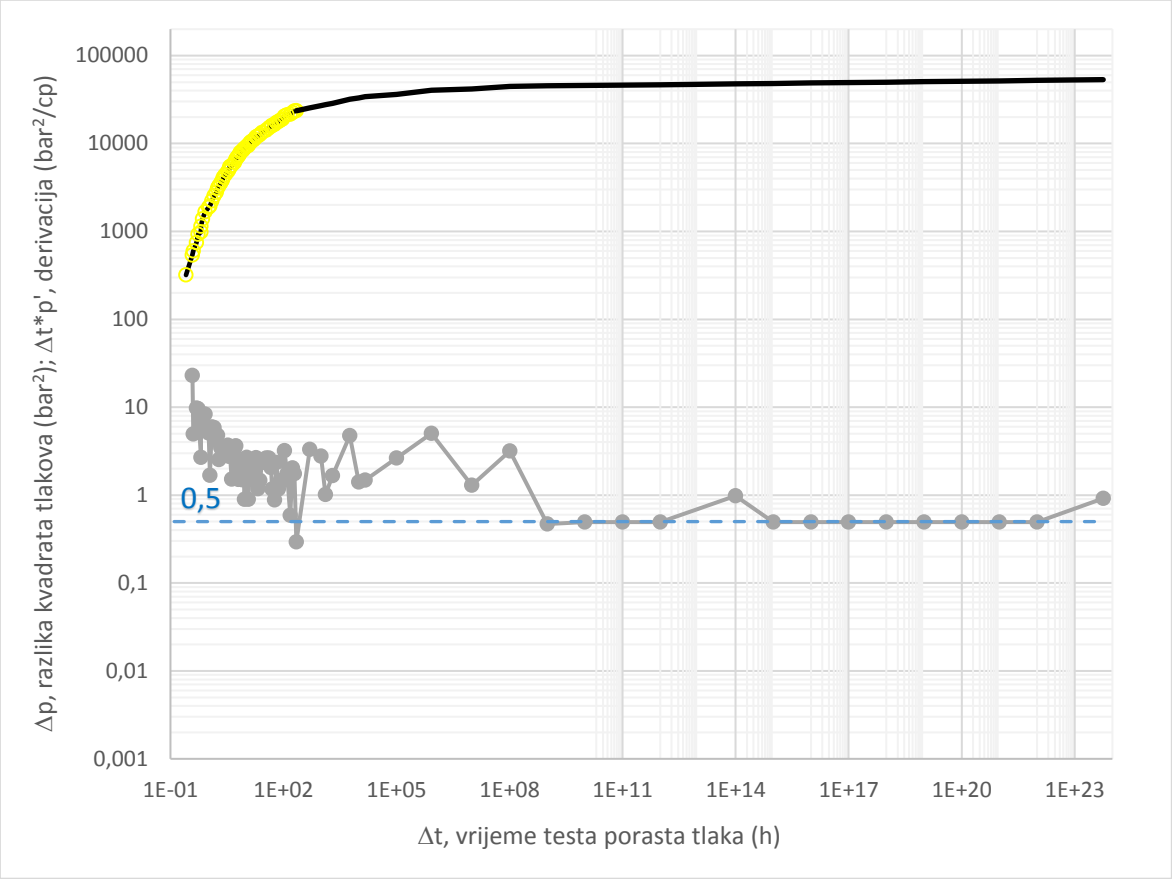
Tablica 30: Optimalna ekstrapolacija krivulje porasta tlaka, ležište Perth Basin

točke	Δt (h)	Δp (bar^2)
3	2,19E+2	23570,02
D1	5,00E+2	25388,4
D2	1,00E+3	27026,4
5	1,29E+3	27650,6
D3	2,00E+3	28701,1
6	5,81E+3	31928,2
D4	1,00E+4	32951,12
7	1,47E+4	34067
D5	1,00E+5	36150,81
8	8,38E+5	40483,4
D6	1,00E+7	41679,07
9	1,01E+8	44761
D7	1E+09	45236,16
D8	1E+10	45738,9
D9	1E+11	46247,23
D10	1E+12	46761,21
D11	1E+14	47806,36
D12	1E+15	48337,67
D13	1E+16	48874,88
D14	1E+17	49418,06
D15	1E+18	49967,28
D16	1E+19	50522,6
D17	1E+20	51084,1
D18	1E+21	51651,83
D19	1E+22	52225,87
11	5,702E+23	53316,2

Na slici 96 je otkriveno da bi do pseudo-radijalnog protoka došlo i to nakon otprilike 1E+9 sati testa porasta tlaka, odnosno nakon 114 155 godina. Za ovaj iznos imaginarnog vremena je kod opisa metode pojašnjeno da služi samo kao referentna matematička vrijednost u daljnjoj proceduri određivanja propusnosti slabo propusnog ležišta. I ovom analizom testa porasta tlaka dodatno je dokazano da se trajanje testa u bušotinama slabo propusnih ležišta može minimizirati, što je jedna od hipoteza rada. Dokaz proizlazi iz činjenice da se pojava navedenog pseudo-radijalnog protoka može procijeniti temeljem mjerenja tlaka od samo sto sati.

Druga činjenica koja se na istoj slici uočava je ispunjenje sljedećeg uvjeta za primjenu modificirane metode, da derivacija pada na vrijednost od 0,5, pa je na taj način

omogućeno preklapanje dijagrama sa slike 96 s modificiranim log-log dijagramom na slici 85. Nakon toga se u ovom drugom dijelu primjene nove metode određuju točke preklapanja na oba dijagrama, s pomoću odabrane krivulje, C_D, koja u ovom slučaju ima vrijednost 10^{23}, odakle se nadalje određuje podudarni tlak $(p_D/\Delta p)_M$.

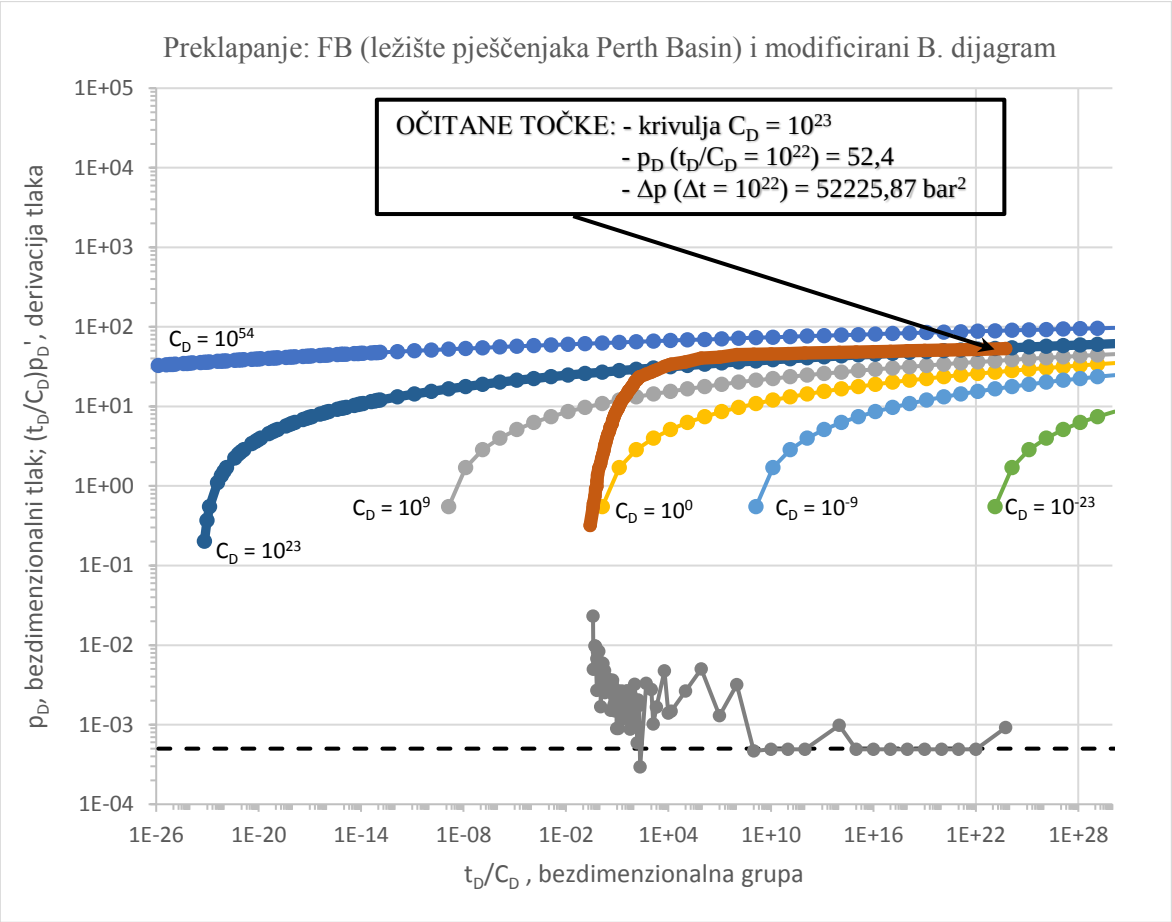


Slika 96: Derivacija ekstrapolirane krivulje testa porasta tlaka, ležište Perth Basin

Kod preklapanja dijagrama je vrijednost, p_D, od 52,4 očitana na iznosu apscise od $t_D/C_D = 10^{22}$, a Δp na iznosu apscise od $\Delta t = 10^{22}$ h. Iz njih je izračunat podudarni tlak $(p_D/\Delta p)_M$, koji je analogno preračunat u jedinicu Pa^{-2}:

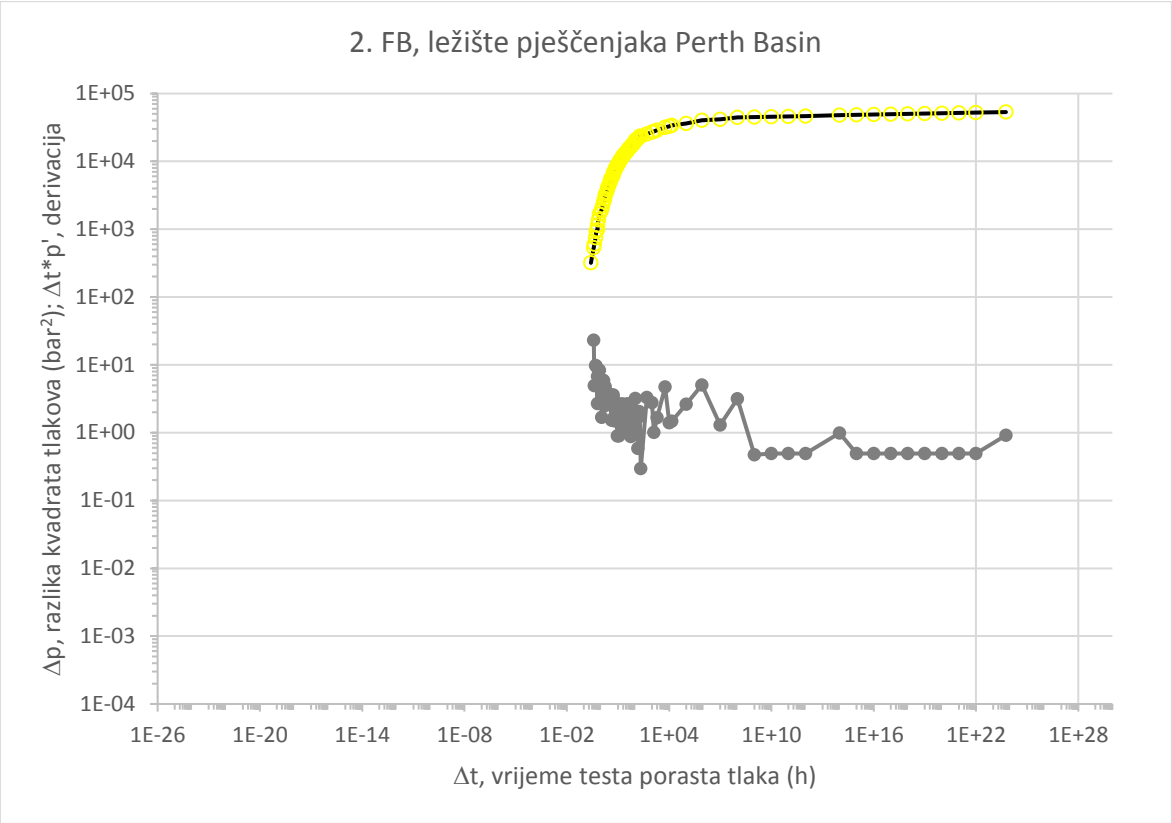
$$\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_M = \frac{52,4}{52225,87} bar^{-2} = 1\times10^{-13} Pa^{-2} \qquad (4.26)$$

Zajednički prikaz preklapanja obaju dijagrama za očitane točke s pomoću odabranih krivulja prikazan je na dijagramu sljedeće slike 97.



Slika 97: Preklapanja modificiranog dijagrama s analiziranim testom FB, ležište Perth Basin

Za matematički adekvatno preklapanje dvaju dijagrama na prethodnoj slici, bilo je potrebno prilagoditi logaritamske skale i njihove razmake na koordinatama analiziranog testa porasta za FB sa slike 96, što je prikazano na slici 98.



Slika 98: Konačan oblik analize 2. testa porasta FB za preklapanje s Bourdet dijagramom

Zatim su sve vrijednosti za odabranu bušotinu na ležištu Perth Basin (tablica 26) uvrštene u jednadžbu (4.20), te je s pomoću podudarnog tlaka iz jednadžbe (4.26) izračunata propusnost stijene:

$$k = \frac{q}{10^6 \times 10^y} \times K_1 \times \left(\frac{p_D}{\Delta p} \right)_M = \frac{q}{10^6 \times 10^y} \times \frac{2 \cdot 101325 \cdot 0,000012 \cdot 0,8 \cdot 366,5}{283,15 \cdot 3,14 \cdot 112} \times 1 \cdot 10^{-13} =$$

$$= \frac{q}{10^6 \times 10^y} \times 0,007 \times 1 \cdot 10^{-13} = \frac{q}{10^6 \times 10^y} \times 7 \cdot 10^{-16} = \frac{0,5}{10^6 \times 10^1} \times 7 \cdot 10^{-16} = \quad (4.27)$$

$$= 3,51 \cdot 10^{-23} m^2$$

U usporedbi s rezultatom dobivenim u radu Bahramija i suradnika, gdje je izračunata propusnost od 0,006 mD, a za koju autori tvrde da je jednaka iznosu dobivenom laboratorijskim mjerenjem na jezgri, zaključeno je da jednadžbu (4.20) u slučaju FB treba korigirati. To je i logički, s obzirom da se u ovim bušotinama očekuju manji protoci nego kod VFHB. Stoga je u jednadžbi (4.28) modificiran protok, kojeg je u ovom slučaju za točnost rezultata potrebno podijeliti s 10^3, a eksponentu *y* treba dodati predznak minus:

$$k = \frac{q}{10^3 \times 10^{-y}} \times K_1 \times \left(\frac{p_D}{\Delta p} \right)_M = \frac{q}{10^3 \times 10^{-y}} \times \frac{2 p_{sc} \mu Z T}{T_{sc} \pi h} \times \left(\frac{p_D}{\Delta p} \right)_M \tag{4.28}$$

Na taj način se jednadžbom (4.29) dobiva približno isti rezultat propusnosti stijene od 0,004 mD, kao pri mjerenju jezgre. Ova modifikacija jednadžbe (4.28), za određivanje propusnosti slabo propusnog plinskog ležišta testom porasta tlaka u frakturiranoj bušotini, je provjerena i potvrđena i u sljedećem primjeru frakturirane bušotine na ležištu pješčenjaka Montney u Kanadi.

$$\begin{aligned} k &= \frac{q}{10^3 \times 10^{-y}} \times K_1 \times \left(\frac{p_D}{\Delta p} \right)_M = \frac{q}{10^3 \times 10^{-y}} \times \frac{2 \cdot 101325 \cdot 0,000012 \cdot 0,8 \cdot 366,5}{283,15 \cdot 3,14 \cdot 112} \times 1 \cdot 10^{-13} = \\ &= \frac{q}{10^3 \times 10^{-y}} \times 0,007 \times 1 \cdot 10^{-13} = \frac{q}{10^3 \times 10^{-y}} \times 7 \cdot 10^{-16} = \frac{0,5}{10^2} \times 7 \cdot 10^{-16} = \\ &= 3,51 \cdot 10^{-18} m^2 \approx 0,004 mD \end{aligned} \tag{4.29}$$

I ovim rezultatom od 0,004 mD je dokazana glavna hipoteza rada da se analizom testa porasta tlaka u bušotinama slabo propusnih ležišta može pouzdano procijeniti propusnost stijene. Odavde slijedi i dokaz hipoteze da se konvencionalne metode za analizu testa porasta tlaka mogu prilagoditi za primjenu u nekonvencionalnim plinskim ležištima u svrhu određivanja potrebnog trajanja testa porasta. Isti primjer analiziran je u nastavku primjenom nove metode u softveru, gdje su također dokazane iste hipoteze rada.

Za primjenu i provjeru metode i na ovom testu u programu Saphir, potrebno je najprije odrediti efektivni radijus, koji za frakturiranu bušotinu slijedi iz slike 22. Ako se prema podacima iz tablice 26 izračuna bezdimenzionalna vodljivost frakture, C_{fD}, koja iznosi 380, s pomoću vrijednosti za poluduljinu frakture od 22,9 m, slijedi očitana vrijednost efektivnog radijusa ove bušotine od 11,45 m.

Nakon toga je, razvojem metode utvrđeno, da kod frakturiranih bušotina efektivni radijus iznosi značajno manje nego kod VFHB, u prosjeku i do 10 puta manje. Ukupni protoci također su manji, pa se parametri, t_p, i, q_p, kod frakturiranih bušotina računaju prema:

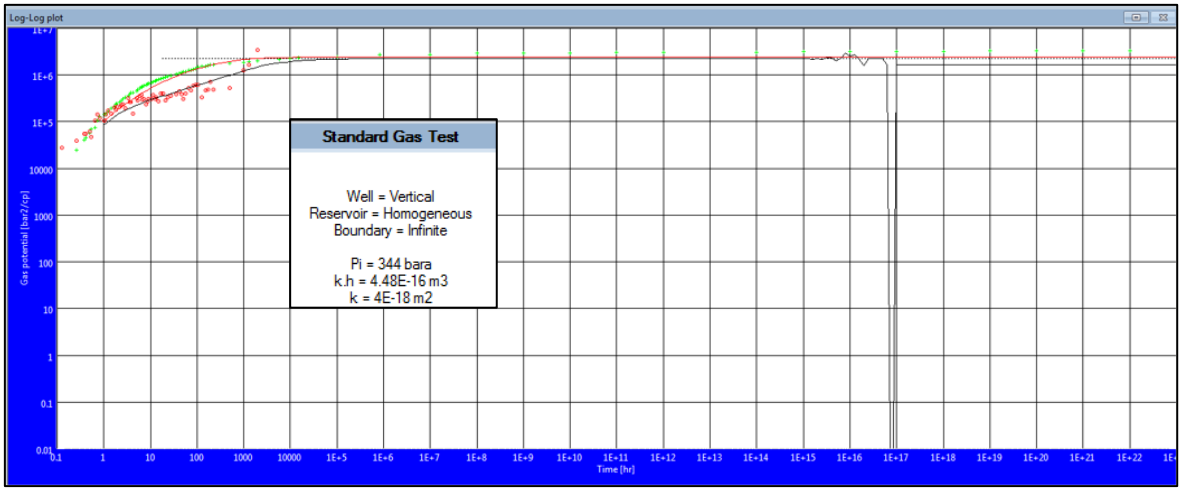
$$t_p = t_{p(st\,var\,ni)} = 220h \tag{4.30}$$

i

$$q_p = q_{(st\,var\,ni)} = 0,5 m^3 / s \tag{4.31}$$

što je također potvrđeno u primjeru frakturirane bušotine na ležištu pješčenjaka Montney.

Kada se, analogno opisanoj proceduri u etalonskom primjeru, prema svim potrebnim ulaznim podacima provede analiza testa porasta u programu Saphir, dobiva se rezultat za propusnost stijene od 0,004 mD tj. 4E-18 m^2 (slika 99) što je ista vrijednost kao i kod primjene nove metode i rezultata dobivenog u jednadžbi (4.29). U opisu rezultata na slici 99 (engl. *Standard Gas Test*), uz osnovne pretpostavke o ležištu, da je homogeno i neograničeno, također se vidi i dobar rezultat o početnom ležišnom tlaku od 344 bara. Kod modeliranja u log-log dijagramu je postignuto da crvena linija u potpunosti aproksimira ulazne podatke mjerenog tlaka, označene zelenom bojom. Crna linija modela se s nešto manjom točnošću preklapa s crveno označenim derivacijama tlaka u prvom dijelu testa porasta, ali je značajno da je program prepoznao krajnji pseudo-radijalni protok, do kojeg bi došlo nakon 1E+17 sati. U usporedbi s rezultatom nove metode, gdje se na slici 98 može vidjeti da bi do ovog oblika protoka došlo nakon 1E+15 sati, može se zaključiti da je metoda pouzdana, jer su u oba slučaja izračunate jednake vrijednosti propusnosti od 0,004 mD.



Slika 99: Log-log dijagram i rezultati analize testa porasta tlaka u programu Saphir, ležište Perth Basin

5.1.2. Primjena nove metode na ležištu Montney, Alberta

Analiza testa porasta tlaka napravljena je prema ulaznim podacima za frakturiranu bušotinu u ležištu pješčenjaka iz tablice 31 (Garcia et al., 2006). S obzirom da je u prethodnom odlomku detaljno opisana primjena nove metode za isti slučaj bušotine i ležišta, i u ovom i u idućem primjeru su pojedini koraci primjene metode prikazani sažetije.

Originalni test porasta tlaka iz ovog rada je na ordinati dan parametrom razlike pseudo-tlakova, $\Delta m(p)$, u jedinici 10^6x(kPa^2/Pa·s), pa je sukladno novoj metodi, ordinata

najprije preračunata u razliku kvadrata tlakova, Δp, izraženu u jedinici bar^2. U tablici 32 su skraćeno prikazani karakteristični retci i stupci s ključnim točkama krivulje porasta tlaka, prikazane na slici 100. Kao što se vidi, tijekom mjerenja od 133 sata, krivulja ima prirast od 52 bara do čak 306 bara, što je također značajno brži rast u odnosu na etalonski primjer. Međutim, oblik same krivulje na slici 100 je vrlo sličan prirastu etalonske krivulje, jer već krajem testa polako ulazi u područje stabilizacije, što nije bio slučaj u prethodnome slučaju, kod testa porasta u ležištu Perth Basin. Osim toga, ovaj brži prirast proizlazi i iz činjenice da je ovo ležište propusnije od etalonskog za red veličine od deset puta (SGS Canada, 2015), što je potvrđeno i na kraju analize ovog testa porasta, pri proračunu propusnosti.

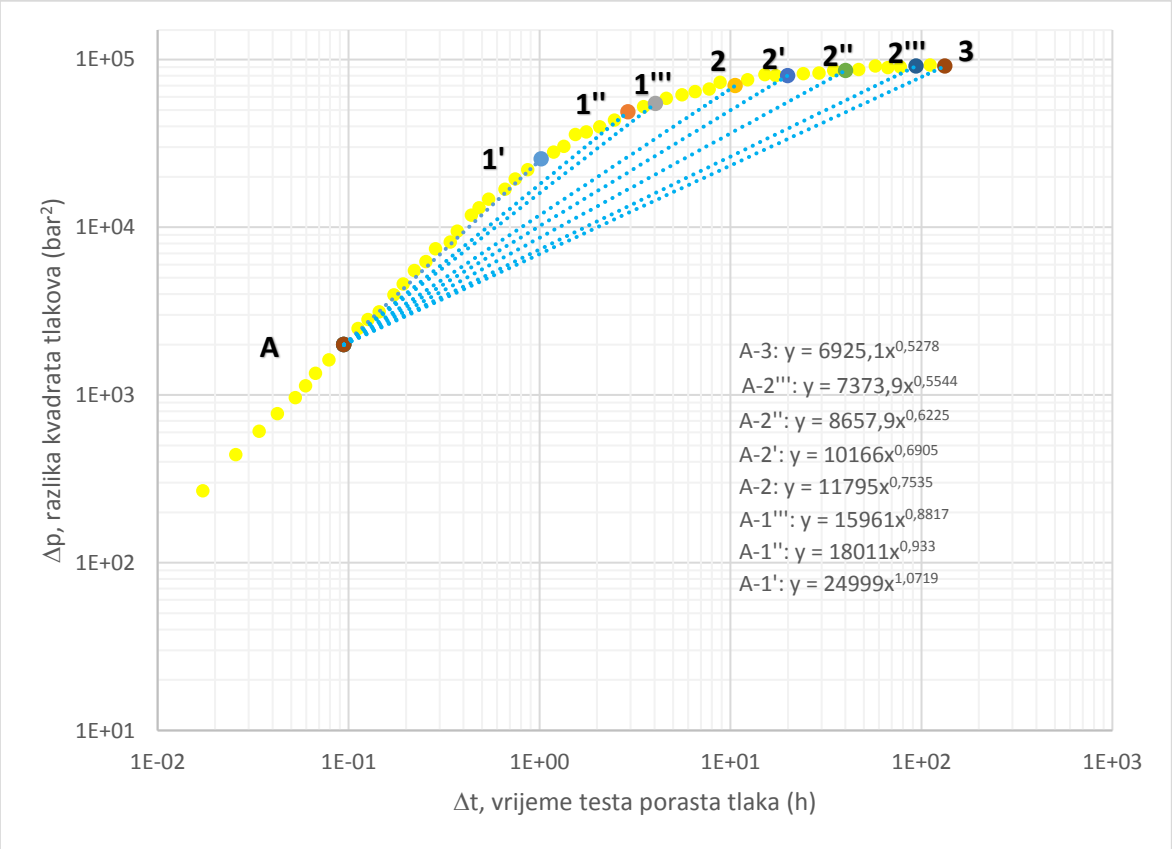
Tablica 31: Osnovna svojstva ležišta Montney, bušotine i 3. testa porasta tlaka

Naziv ležišta i broj testa porasta:	**Montney, 3. test**	
Svojstva ležišta i FB	Iznos	Jedinice
Radijus bušotine, r_w	0,1	m
Efektivna debljina ležišta, h	50	m
Početni ležišni tlak, p_i	350	bar
Ležišna temperatura, T_R	90	^oC
Šupljikavost ležišne stijene, ϕ	0,05	dio cijelog
Ukupna stlačivost, c_t	6,4E-8	Pa^{-1}
Dinamička viskoznost plina, μ	3,7E-5	Pa·s
Z faktor plina, -	0,8	-
Poluduljina frakture, x_f	10	m
Vodljivost frakture, C_f	40E-15	$m^2 \cdot m$
Vrijeme testa porasta tlaka, Δt	133	h
Vrijeme konstantnog protoka, t_p	7,5	h
Konstantan protok plina	12E+5	m^3/dan

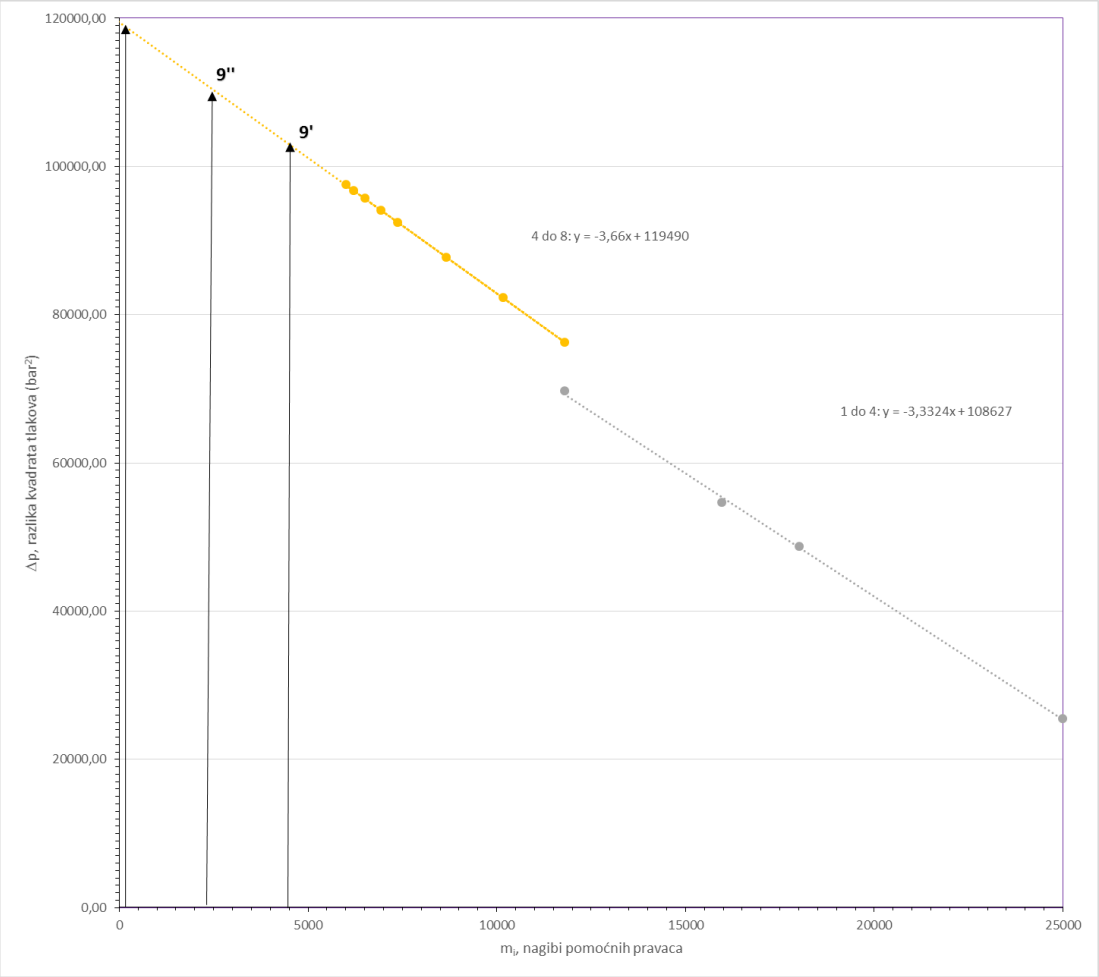
Tablica 32: Test porasta tlaka, ležište Montney

točke	Δt (h)	Δm(p) 10^6x(kPa^2/Pa·s)	p (bar)	p^2 (bar^2)	Δp (bar^2)
	1,73E-02	0,16	52,61	2768,02	268,02
A	9,45E-02	1,18	67,03	4493,61	1993,61
1'	1,02E+00	15,10	167,36	28009,72	25509,72
1"	2,90E+00	28,84	226,30	51209,70	48709,70
1"'	4,04E+00	32,38	239,14	57189,30	54689,30
2	1,06E+01	41,31	268,85	72281,20	69781,20
2'	1,99E+01	47,49	287,61	82720,92	80220,92
2"	4,00E+01	50,96	297,62	88578,40	86078,40
2"'	9,36E+01	54,07	306,32	93833,88	91333,88
3	1,33E+02	54,11	306,43	93897,68	91397,68

Na sljedećoj slici, su sukladno opisanoj proceduri kod razvoja metode postavljene ključne i pomoćne točke iz kojih su dobiveni nagibi, m_i, za konstrukciju dijagrama na slici 101. Nakon toga je analogno postavljena modelirana jednadžba $y_{4\text{-}8}$, s pomoću koje su očitani nagibi, m_i, za ekstrapolaciju točaka od 9' do 9"' u nepoznato područje krivulje porasta (tablica 33). Za njih su zatim određene razlike kvadrata tlakova, Δp, kao i vremena njihovog postizanja, Δt, temeljem jednadžbe za određivanje iznosa potencije, n (tablica 34).



Slika 100: Nagibi pravaca od točke A do odabranih točaka na krivulji porasta, ležište Montney



Slika 101: Nagibi pravaca u odnosu na razliku kvadrata tlakova, ležište Montney

Tablica 33: Izračun razlike kvadrata tlakova za pojedine nagibe, m_i, ležište Montney

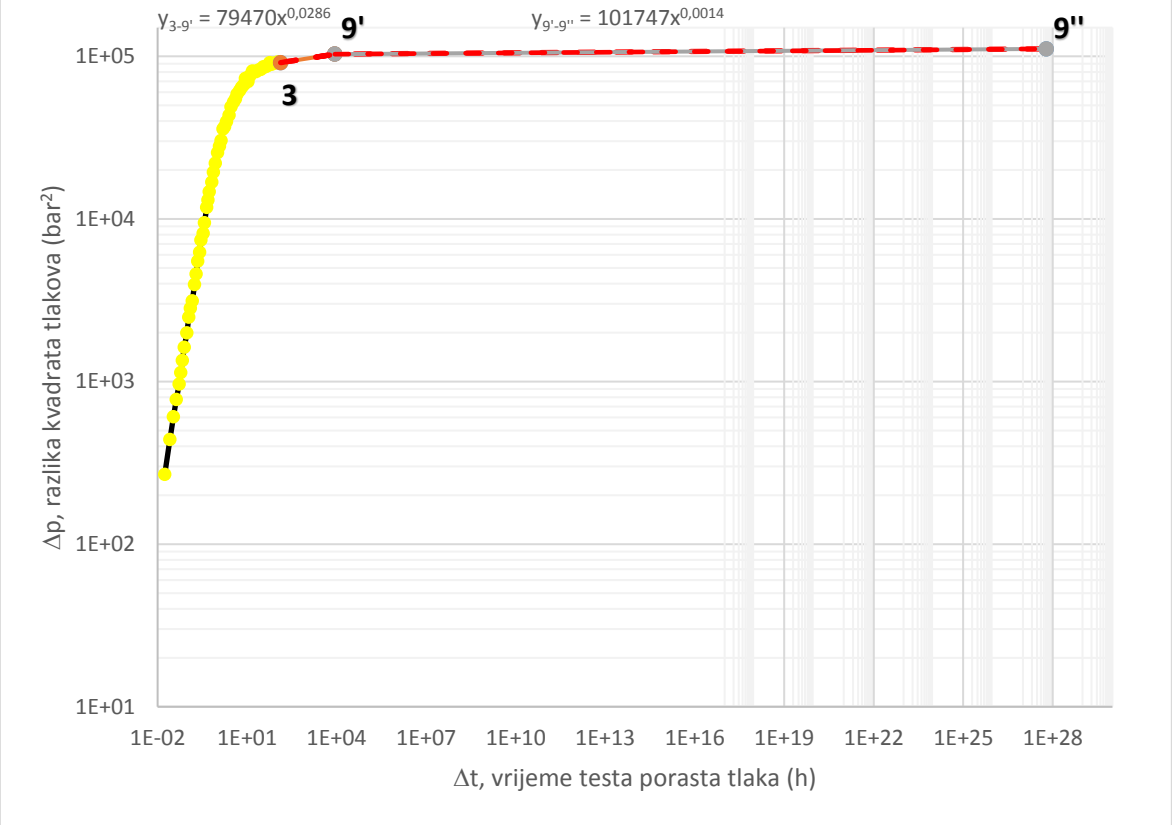
točke	m_i	Δp (bar^2)
9'	4500	103020
9''	2300	111072
9'''	100	119124

Tablica 34: Izračun iznosa potencije, *n*, i vremena trajanja testa porasta, *Δt*, za pojedine tlakove, ležište Montney

točke	n	Δt (h)	Δp (bar^2)
9'	0,35	8,71E+03	103020
9''	0,06	6,14E+27	111072
9'''	-1,27		

Iz tablice 34 je također vidljivo, kao i u prethodnom primjeru za ležište Perth Basin, da iznos potencije, *n*, postaje negativan, ubrzo nakon iznosa nagiba, *m*, od 2300, što znači da bi i u ovom slučaju, nakon eventualne pojave pseudo-radijalnog protoka, došlo do polu-stacionarnog stanja u bušotini.

Stoga je u sljedećem koraku optimalno ekstrapolirana krivulja porasta tlaka do točke 9" (slika 102). Na ovom dijagramu su za svaki segment određene jednadžbe potencije za ekstrapolaciju. Prema njima su u tablici 35, za dodatne odabrane točke od D1 do D3, određeni tlakovi za cjelovitu krivulju porasta. Njena derivacija je u konačnici prikaza na slici 103, sukladno već opisanim procedurama.



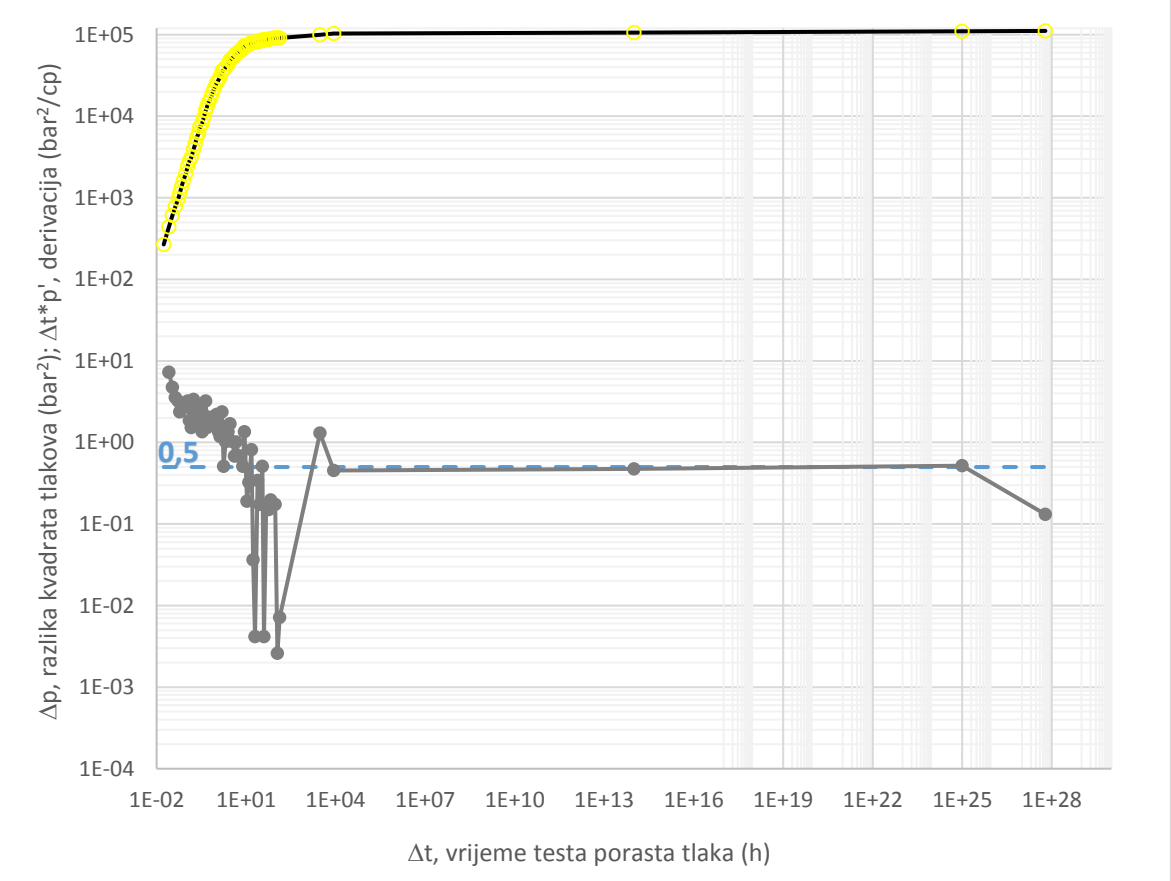
Slika 102: Segmenti za optimalnu ekstrapolaciju krivulje porasta tlaka, ležište Montney

Ovime je postignut cilj primjene metode da je došlo do uspostave pseudo-radijalnog protoka, kao i do ispunjenja uvjeta da derivacija krivulje testa porasta pada na vrijednost 0,5. I ovom, trećom analizom testa porasta tlaka također je dokazano da se trajanje testa u bušotinama slabo propusnih ležišta može minimizirati, što je jedna od hipoteza rada. Dokaz proizlazi iz činjenice da se pojava navedenog pseudo-radijalnog protoka može procijeniti

temeljem mjerenja tlaka od samo sto sati. Time je omogućena primjena modificiranog Bourdet log-log dijagrama za očitanje podudarnih točki tj. za proračun podudarnog tlaka, odakle se računa propusnost stijene, prema modificiranim izrazima, definiranim razvojem nove metode.

Tablica 35: Optimalna ekstrapolacija krivulje porasta tlaka, ležište Montney

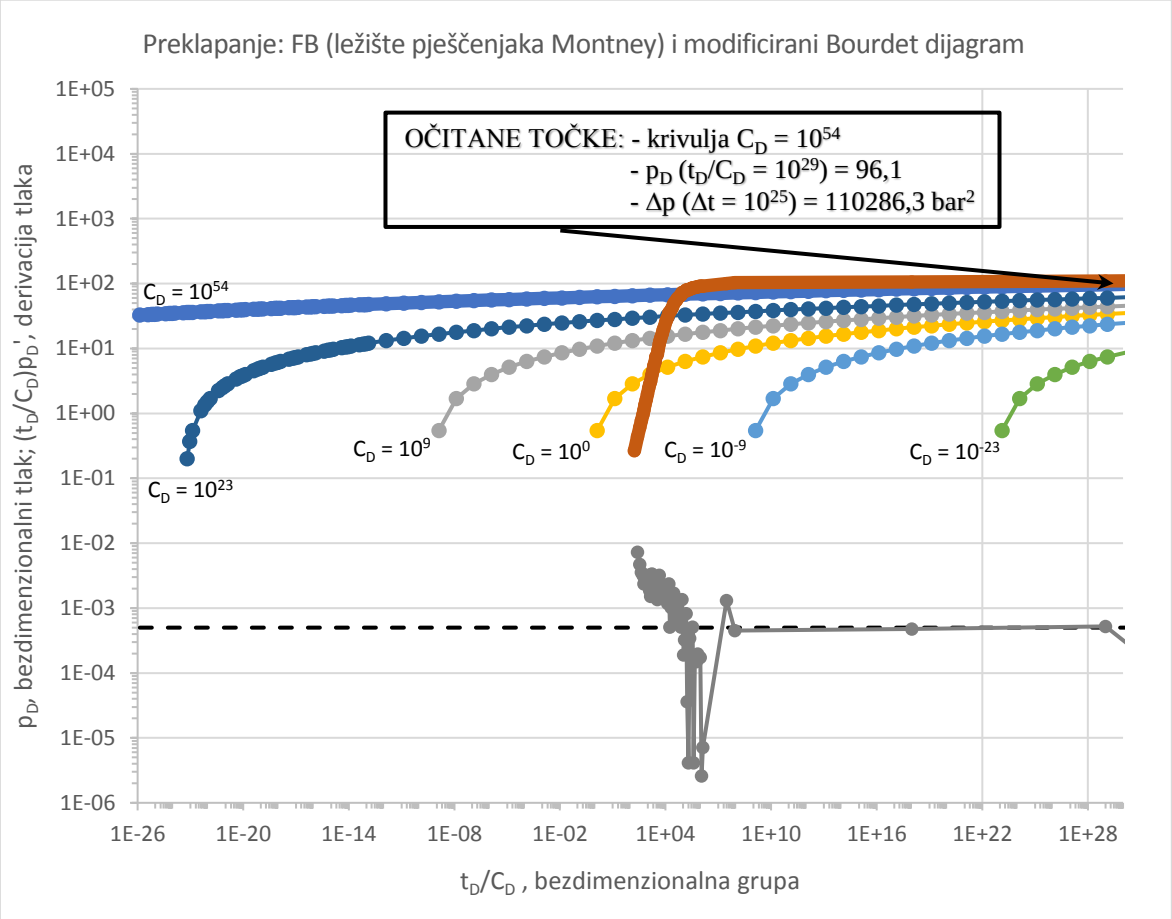
točke	Δt (h)	Δp (bar^2)
	1,73E-02	268,02
A	9,45E-02	1993,61
2	1,06E+01	69781,20
3	1,33E+02	91397,68
D1	3,00E+3	99919,185
9'	8,71E+3	103047,6
D2	1,00E+14	106444,1
D3	1,00E+25	110286,31
9"	6,13E+27	111281,91



Slika 103: Derivacija ekstrapolirane krivulje testa porasta tlaka, ležište Montney

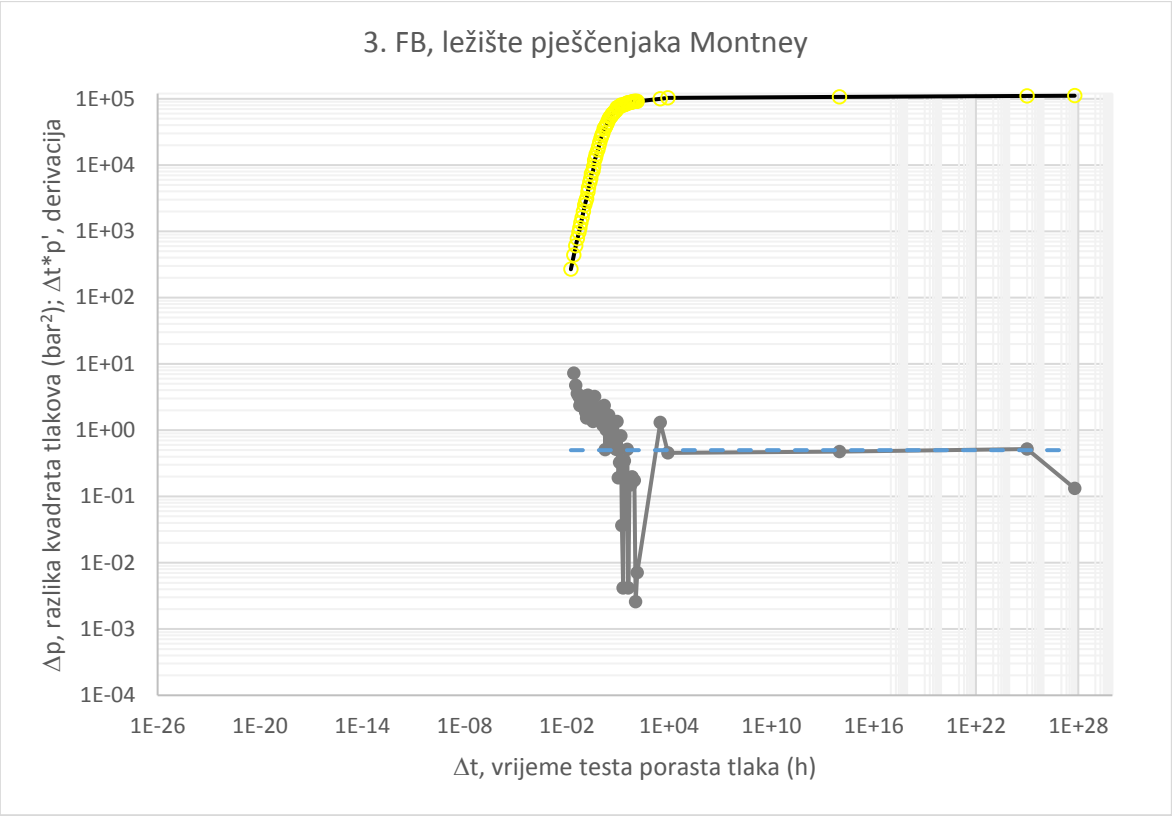
Preklapanje krivulje testa porasta tlaka s modificiranim dijagramom prikazano je na slici 104, a za očitanje je odabrana krivulja $C_D = 10^{54}$. Vrijednost, p_D, od 96,1 je očitana na iznosu apscise od $t_D/C_D = 10^{29}$, kao i, Δp, na iznosu apscise od $\Delta t = 10^{25}$ h. Iz njih je izračunat podudarni tlak, $(p_D/\Delta p)_M$, koji je analogno preračunat u jedinicu Pa^{-2}:

$$\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_M = \frac{96,1}{110286,3} bar^{-2} = 8,7\times10^{-14}\, Pa^{-2} \qquad (4.32)$$



Slika 104: Preklapanja modificiranog dijagrama s analiziranim testom FB, ležište Montney

Za matematički adekvatno preklapanje dvaju dijagrama na prethodnoj slici, bilo je potrebno prilagoditi logaritamske skale i njihove razmake na koordinatama analiziranog testa porasta za FB sa slike 103, što je prikazano na slici 105.



Slika 105: Konačan oblik analize 3. testa porasta FB za preklapanje s Bourdet dijagramom

Zatim je prema modificiranoj jednadžbi (4.28) za izračun propusnosti u frakturiranoj bušotini izračunata njena vrijednost, koja iznosi:

$$k = \frac{q}{10^3 \times 10^{-y}} \times K_1 \times \left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_M = \frac{q}{10^3 \times 10^{-y}} \times \frac{2 \cdot 101325 \cdot 0,000037 \cdot 0,8 \cdot 363,15}{283,15 \cdot 3,14 \cdot 50} \times 8,7 \cdot 10^{-14} =$$

$$= \frac{q}{10^3 \times 10^{-y}} \times 0,04806 \times 8,7 \cdot 10^{-14} = \frac{q}{10^3 \times 10^{-y}} \times 4,18 \cdot 10^{-15} = \frac{13,9}{10^3} \times 4,18 \cdot 10^{-15} = \quad (4.33)$$

$$= 5,8 \cdot 10^{-17} m^2 = 0,05 mD$$

Dobiveni iznos od 0,05 mD jednak je propusnosti iz originalnog rada, za koju autori tvrde da je ekvivalentan mjerenoj propusnosti jezgre. Time je ponovno dokazana glavna hipoteza rada da se analizom testa porasta tlaka u bušotinama slabo propusnih ležišta može pouzdano procijeniti propusnost stijene. Odavde proizlazi i dokaz hipoteze da se konvencionalne metode za analizu testa porasta tlaka mogu prilagoditi za primjenu u nekonvencionalnim plinskim ležištima u svrhu određivanja potrebnog trajanja testa porasta. Isti primjer analiziran je u nastavku primjenom nove metode u softveru, gdje su također dokazane iste hipoteze rada.

Za provjeru metode i na ovom testu u programu Saphir, potrebno je najprije odrediti efektivni radijus, koji ponovno slijedi iz slike 22. Ako se prema podacima iz tablice 31 izračuna bezdimenzionalna vodljivost frakture, C_{fD}, koja spada u područje dobre vodljivosti, s pomoću vrijednosti za poluduljinu frakture od 10 m, slijedi očitana vrijednost efektivnog radijusa ove bušotine, od 5 m.

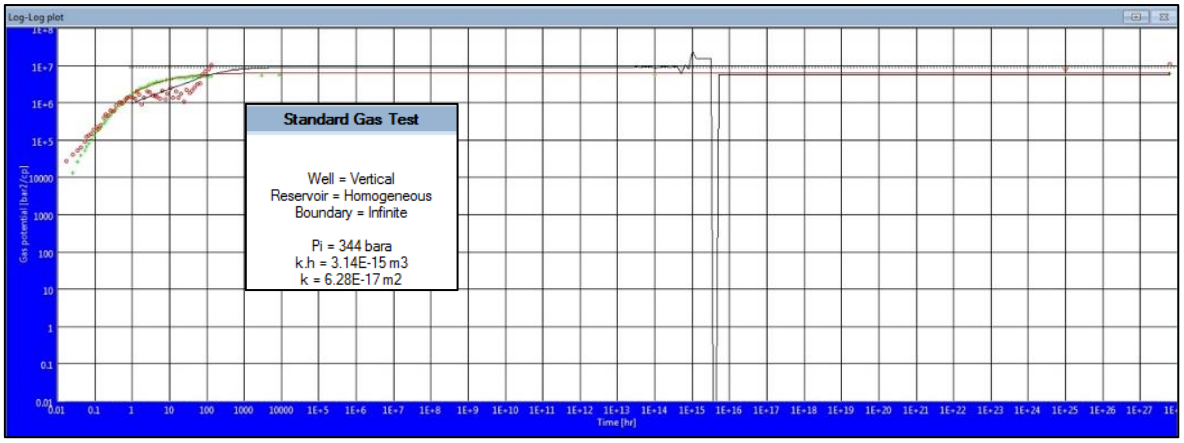
Nakon toga se prema jednadžbama (4.30) i (4.31) računaju t_p i q_p, koji iznose:

$$t_p = t_{p(st\,var\,ni)} = 7,5h \tag{4.34}$$

i

$$q_p = q_{(st\,var\,ni)} = 13,9m^3 / s \tag{4.35}$$

Kada se, analogno opisanoj proceduri, prema ulaznim podacima provede analiza testa porasta u programu Saphir, dobiva se rezultat za propusnost stijene od 0,06 mD, odnosno 6,28E-17 m^2 (slika 106) što je približno jednaka vrijednost kao i kod primjene nove metode i rezultata dobivenog jednadžbom (4.33). U opisu rezultata na slici 106 (eng. *Standard Gas Test*), uz osnovne pretpostavke o ležištu, da je homogeno i neograničeno, također je postignut dobar rezultat o početnom ležišnom tlaku od 344 bara. Isto tako, crvena linija u potpunosti aproksimira ulazne podatke mjerenog tlaka označene zelenom bojom, dok se crna linija s nešto manjom točnošću preklapa s crveno označenim derivacijama tlaka u prvom dijelu krivulje testa porasta, ali je program prepoznao krajnji pseudo-radijalni protok, do kojeg bi došlo nakon 1E+16 sati. U usporedbi s rezultatom nove metode, može se također zaključiti da je metoda pouzdana, jer su u oba slučaja izračunate približno jednake vrijednosti propusnosti.



Slika 106: Log-log dijagram i rezultati analize testa porasta tlaka u programu Saphir, ležište Montney

5.2. Testovi porasta tlaka u VFHB

5.2.1. Primjena nove metode na ležištu Changqing, Kina

Analiza testa porasta tlaka napravljena je prema ulaznim podacima za višestruko frakturiranu horizontalnu bušotinu u ležištu pješčenjaka iz tablice 36 (Yuan et al., 2013).

Tablica 36: Osnovna svojstva ležišta Changqing, bušotine i 4. testa porasta tlaka

Naziv ležišta i broj testa porasta:	**Changqing, 4. test**	
Svojstva ležišta i VFHB	Iznos	Jedinice
Radijus bušotine, r_w	0,1	m
Duljina horizontalnog kanala, L	824	m
Efektivna debljina ležišta, h	8,3	m
Početni ležišni tlak, p_i	294	bar
Ležišna temperatura, T_R	103,3	^oC
Šupljikavost ležišne stijene, ϕ	0,081	dio cijelog
Ukupna stlačivost, c_t	1,8E-8	Pa^{-1}
Dinamička viskoznost plina, μ	4,2E-5	Pa·s
Z faktor plina, -	0,97	-
Poluduljina frakture, x_f	60	m
Broj poprečnih fraktura, N	5	-
Radijus frakture, r_f	4,15	m
Trajanje testa porasta tlaka, Δt	1 120	h
Vrijeme konstantnog protoka, t_p	715,62	h
Konstantan protok plina	82,5E+6	m^3/dan

Originalni test porasta tlaka iz ovog rada dan je na ordinati parametrom razlike pseudo-tlakova $\Delta m(p)$ u jedinici (10^{-3}x(MPa^2/Pa·s)), pa je sukladno novoj metodi, ordinata najprije preračunata u razliku kvadrata tlakova Δp, izraženu u jedinici bar^2. U tablici 37 su skraćeno prikazani karakteristični retci i stupci s ključnim točkama krivulje porasta tlaka, prikazane na slici 107.

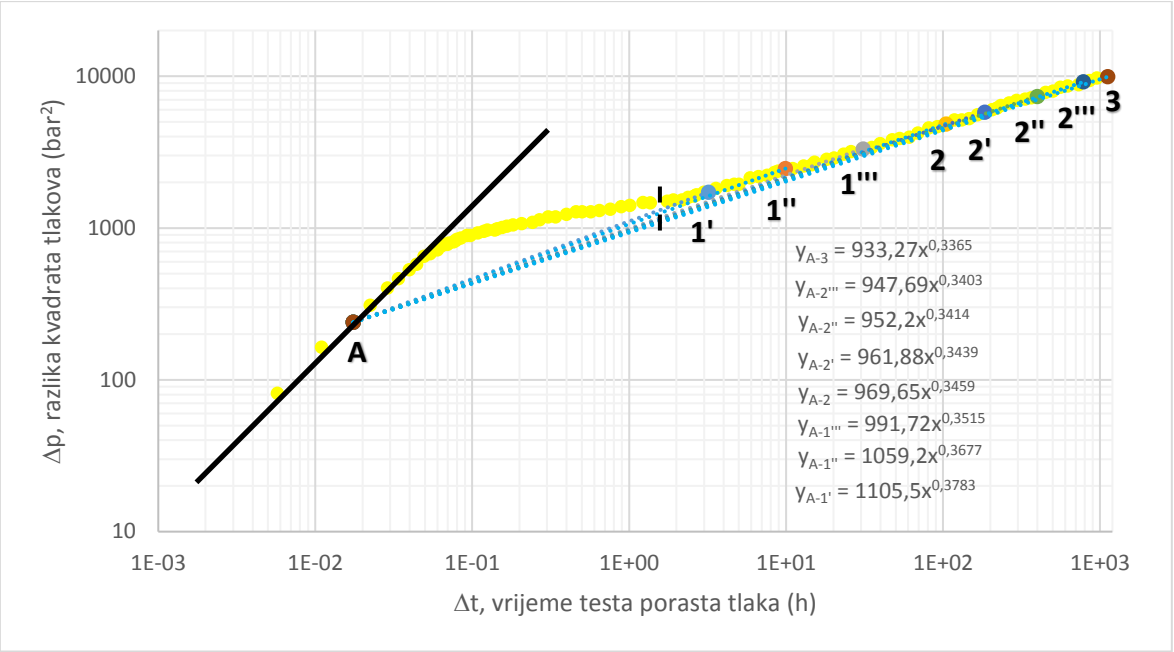
Krivulja ima prirast od 259 bara do 273 bara, što je slično rastu krivulje iz etalonskog primjera, jer se pred kraj mjerenja krivulja bliži obliku stabilizacije, kao i početnom ležišnom

tlaku. Međutim, značajna razlika je u tome što je test značajno duži, tj. mjeren je punih 1120 sati, pa je stoga pogodan za dokaz i provedbu nove metode.

Na slici 107, su također sukladno opisanoj proceduri kod razvoja metode, postavljene ključne i pomoćne točke iz kojih su dobiveni nagibi, m_i, za konstrukciju dijagrama na slici 108. Na sljedećoj slici je crtkanom linijom označena granica nakon koje krivulja porasta mijenja oblik rasta, jer je ležište vrlo tanko od samo 8 metara, pa su brzo nakon zatvaranja bušotine dosegnute gornja i donja granica, nakon čega tlak u ležištu i dalje raste po krivulji bez naglih promjena. Stoga su točke za određivanje nagiba, *m*, od 1' na dalje, postavljene nakon prestanka djelovanja ove barijere na krivulji porasta.

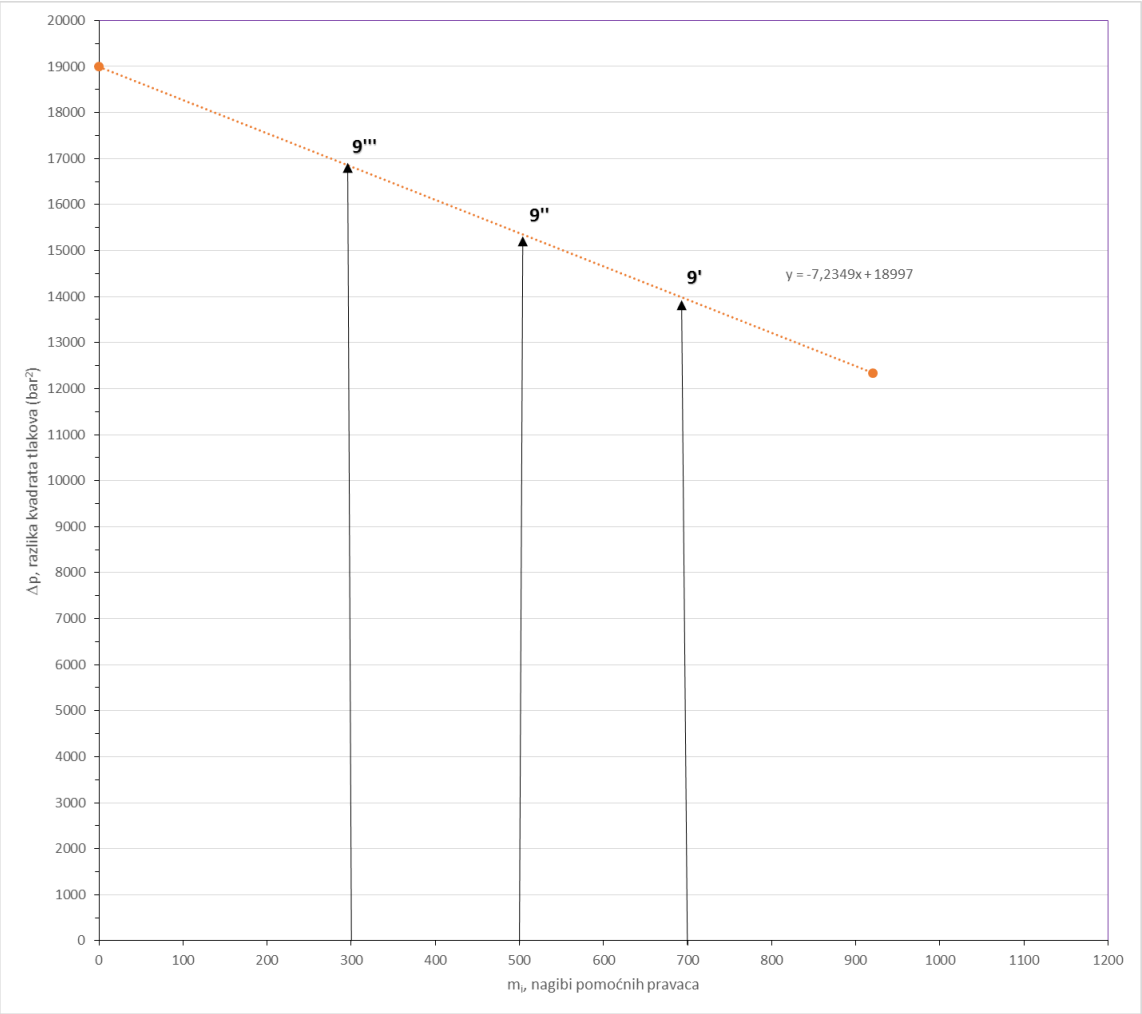
Tablica 37: Test porasta tlaka, ležište Changqing

točke	**Δt (h)**	**Δm(p) 10^{-3} x (MPa^2/Pa·s)**	**p (bar)**	**p^2 (bar^2)**	**Δp (bar^2)**
	5,75E-03	3,99E+01	259,85	67520,18	81,29
A	1,75E-02	1,17E+02	260,15	67678,01	239,12
1'	3,22E+00	8,44E+02	262,98	69158,71	1719,82
1"	9,90E+00	1,21E+03	264,39	69900,15	2461,25
1"'	3,10E+01	1,63E+03	266,00	70755,87	3316,97
2	1,04E+02	2,38E+03	268,85	72281,13	4842,23
2'	1,85E+02	2,84E+03	270,61	73231,53	5792,63
2"	3,99E+02	3,61E+03	273,49	74794,97	7356,07
2"'	7,86E+02	4,50E+03	276,76	76596,58	9157,69
3	1,12E+03	4,87E+03	278,13	77354,21	9915,31



Slika 107: Nagibi pravaca od točke A do odabranih točaka na krivulji porasta, Changqing

Zatim je analogno postavljena modelirana jednadžba (slika 108), s pomoću koje su očitani nagibi m_i za ekstrapolaciju točaka od 9' do 9''', u nepoznato područje krivulje porasta (tablica 38). Za njih su određene razlike kvadrata tlakova, Δp, kao i vremena njihovog postizanja, Δt, temeljem jednadžbe za određivanje iznosa potencije, n (tablica 39).



Slika 108: Nagibi pravaca u odnosu na razliku kvadrata tlakova, ležište Changqing

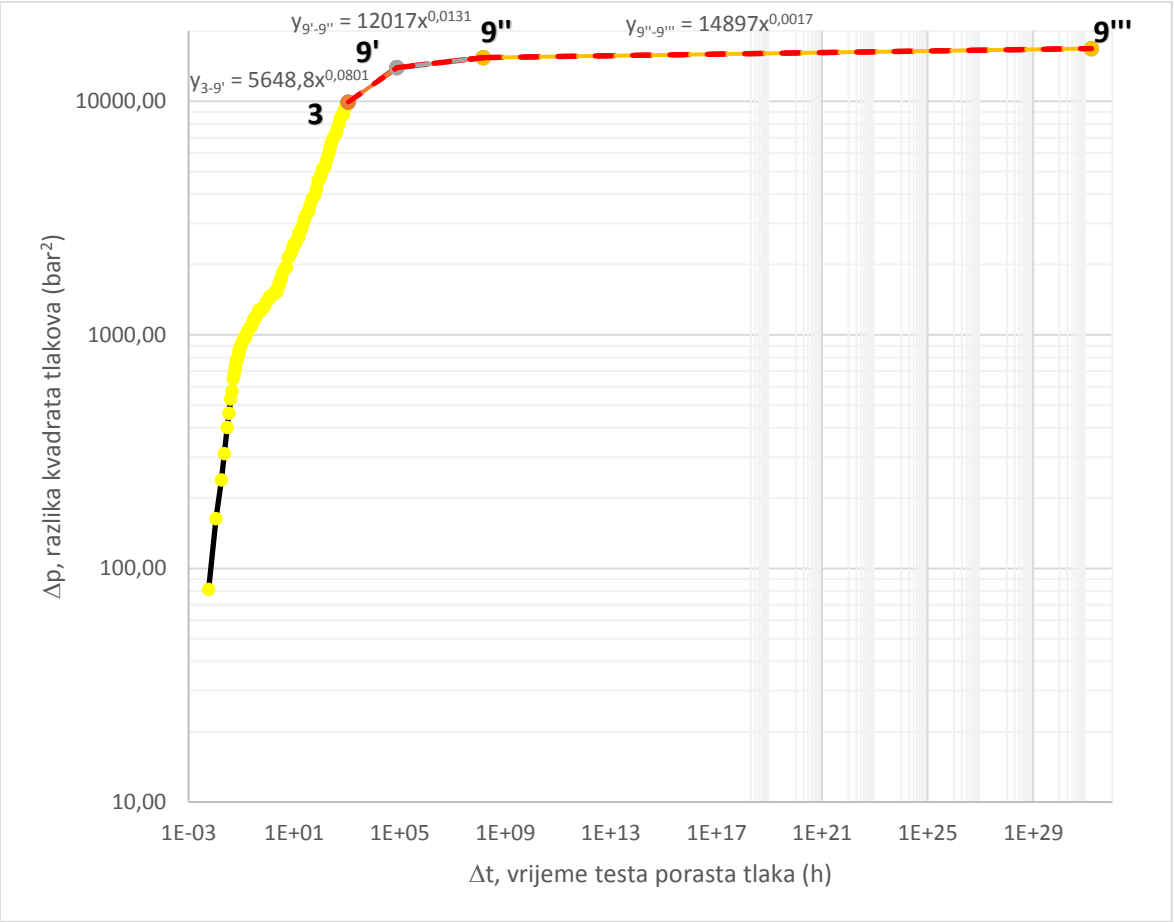
Tablica 38: Izračun razlike kvadrata tlakova za pojedine nagibe, m_i, ležište Changqing

točke	m_i	Δp (bar^2)
9'	700	13932,57
9''	500	15379,55
9'''	300	16826,53

Tablica 39: Izračun iznosa potencije, *n*, i vremena trajanja testa porasta, Δt, za pojedine tlakove, ležište Changqing

točke	n	Δt (h)	Δp (bar^2)
9'	0,27	7,84E+04	13932,57
9''	0,18	1,46E+08	15379,55
9'''	0,06	1,60E+31	16826,53

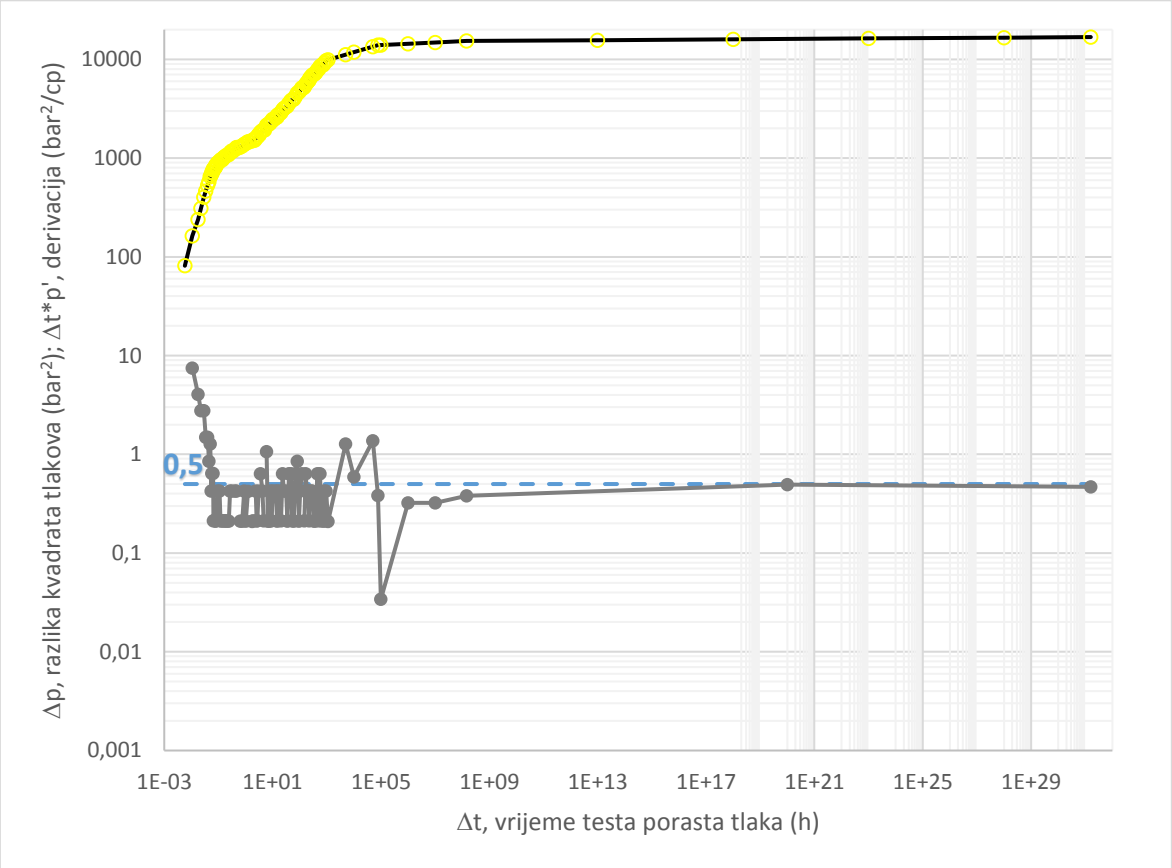
S obzirom da potencije, *n*, nemaju negativnu vrijednost skroz do krajnje točke za nagib $m = 0$ tj. do izjednačavanje tlaka u ležištu, na slici 109 je optimalno ekstrapolirana krivulja porasta tlaka skroz do točke 9'''. Na ovom dijagramu su za svaki segment određene jednadžbe potencije za optimalnu ekstrapolaciju krivulje porasta. Prema njima su u tablici 40, za dodatne točke od D1 do D7, određeni tlakovi za cjelovitu krivulju porasta. Njena derivacija je u konačnici prikaza na slici 110, sukladno opisanim procedurama.



Slika 109: Segmenti za optimalnu ekstrapolaciju krivulje porasta tlaka, ležište Changqing

Tablica 40: Optimalna ekstrapolacija krivulje porasta tlaka, ležište Changqing

točke	Δt (h)	Δp (bar^2)
3	1,12E+3	9914,49
D1	5,00E+3	11174,9
D2	1,00E+4	11812,89
D3	5,00E+4	13438,28
9'	7,83E+4	13928,63
D4	1,00E+05	13973,21
D5	1,00E+06	14401,11
D6	1,00E+07	14842,12
9"	1,46E+08	15380,73
D7	1,00E+20	16110,12
9"'	1,6E+31	16832,32



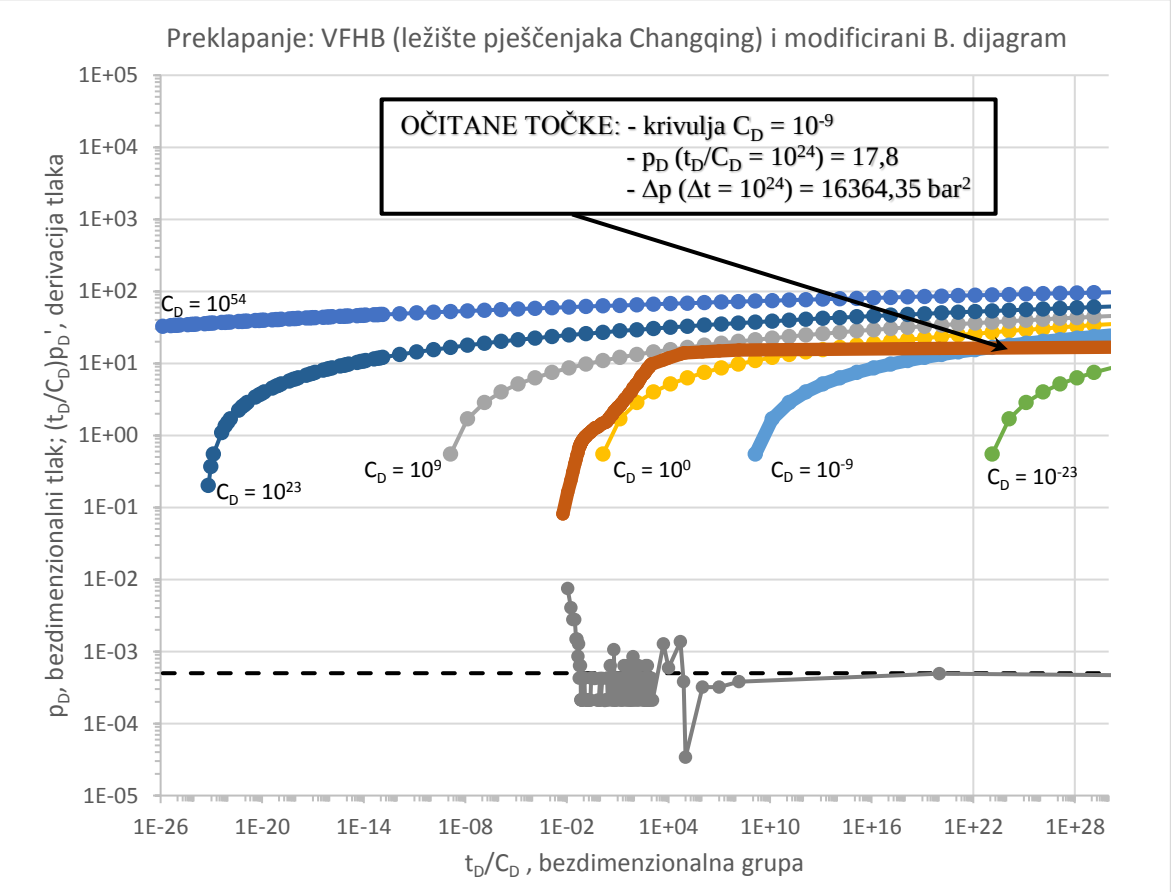
Slika 110: Derivacija ekstrapolirane krivulje testa porasta tlaka, ležište Changqing

U ovom testu je također postignut cilj primjene metode da je došlo do uspostave pseudo-radijalnog protoka, kao i do ispunjenja uvjeta da derivacija krivulje testa porasta

pada na vrijednost 0,5. Time je i ovom, četvrtom analizom testa porasta tlaka dokazano da se trajanje testa u bušotinama slabo propusnih ležišta može minimizirati, što je jedna od hipoteza rada. Dokaz proizlazi iz činjenice da se pojava navedenog pseudo-radijalnog protoka može procijeniti temeljem mjerenja tlaka od samo sto sati. Time je omogućena primjena modificiranog Bourdet log-log dijagrama za očitanje podudarnih točki tj. za proračun podudarnog tlaka, odakle se računa propusnost stijene, prema modificiranim izrazima, definiranim razvojem nove metode.

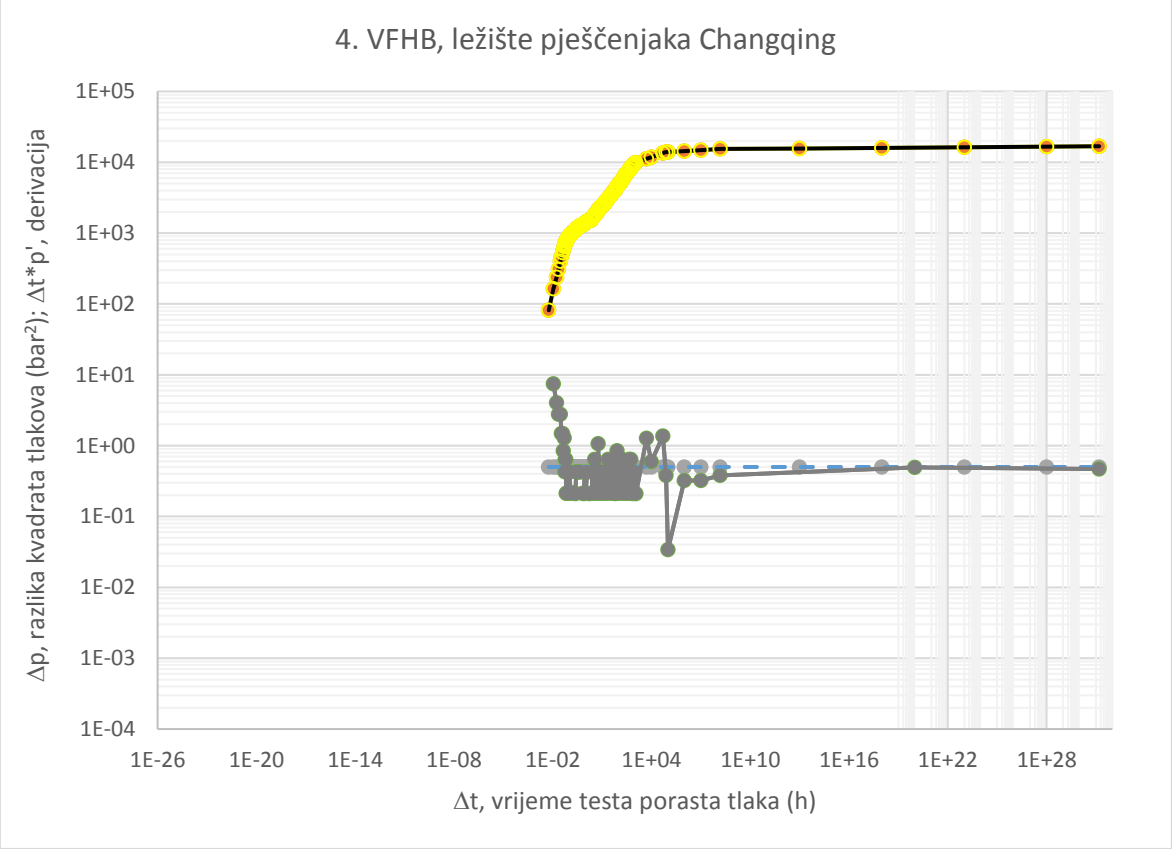
Preklapanje krivulje testa porasta tlaka s modificiranim dijagramom prikazano je na slici 111, a za očitanje je odabrana krivulja $C_D = 10^{-9}$. Vrijednost, p_D, od 17,8 je očitana na iznosu apscise od $t_D/C_D = 10^{24}$, kao i, Δp, na iznosu apscise od $\Delta t = 10^{24}$ h. Iz njih je izračunat podudarni tlak, $(p_D/\Delta p)_M$, koji je analogno preračunat u jedinicu Pa^{-2}:

$$\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_M = \frac{17,8}{16364,35} bar^{-2} = 1,087 \times 10^{-13} Pa^{-2} \qquad (4.36)$$



Slika 111: Preklapanja modificiranog dijagrama s analiziranim testom VFHB, ležište Changqing

Za matematički adekvatno preklapanje dvaju dijagrama na prethodnoj slici, bilo je potrebno prilagoditi logaritamske skale i njihove razmake na koordinatama analiziranog testa porasta za FB sa slike 110, što je prikazano na slici 112.



Slika 112: Konačan oblik analize 4. testa porasta VFHB za preklapanje s Bourdet dijagramom

Zatim je prema modificiranoj jednadžbi (4.20) za izračun propusnosti u VFHB izračunata njena vrijednost, koja iznosi:

$$k = \frac{q}{10^6 \times 10^y} \times K_1 \times \left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_M = \frac{q}{10^6 \times 10^y} \times \frac{2 \cdot 101325 \cdot 0,000042 \cdot 0,97 \cdot 376,45}{283,15 \cdot 3,14 \cdot 8,3} \times 1,08 \cdot 10^{-13} =$$

$$= \frac{q}{10^6 \times 10^y} \times 0,4138 \times 1,08 \cdot 10^{-13} = \frac{q}{10^6 \times 10^y} \times 4,5 \cdot 10^{-14} = \frac{954,86}{10^6 \times 10^{-1}} \times 4,5 \cdot 10^{-14} = \quad (4.37)$$

$$= 0,4 \cdot 10^{-15} m^2 = 0,4 mD$$

Ovim rezultatom od 0,4 mD je po četvrti puta dokazana glavna hipoteza rada da se analizom testa porasta tlaka u bušotinama slabo propusnih ležišta može pouzdano procijeniti propusnost stijene. Odavde isto tako slijedi i dokaz hipoteze da se konvencionalne metode

za analizu testa porasta tlaka mogu prilagoditi za primjenu u nekonvencionalnim plinskim ležištima u svrhu određivanja potrebnog trajanja testa porasta. Isti primjer analiziran je u nastavku primjenom nove metode u softveru, gdje su također dokazane iste hipoteze rada.

Za provjeru metode i na ovom testu u programu Saphir, potrebno je najprije odrediti efektivni radijus bušotine, koji je određen analogno etalonskom primjeru za VFHB. On slijedi iz jednadžbe (2.53), te iznosi 122 m. Za razliku od prvog analiziranog testa u VFHB, on je gotovo 6 puta manji, te je približno jednak maksimalno mogućoj vrijednosti od 100 m, koju je moguće unijeti u softver, pa je time i dobiveni rezultat pouzdaniji i gotovo je identičan originalnoj propusnosti od 0,2 mD.

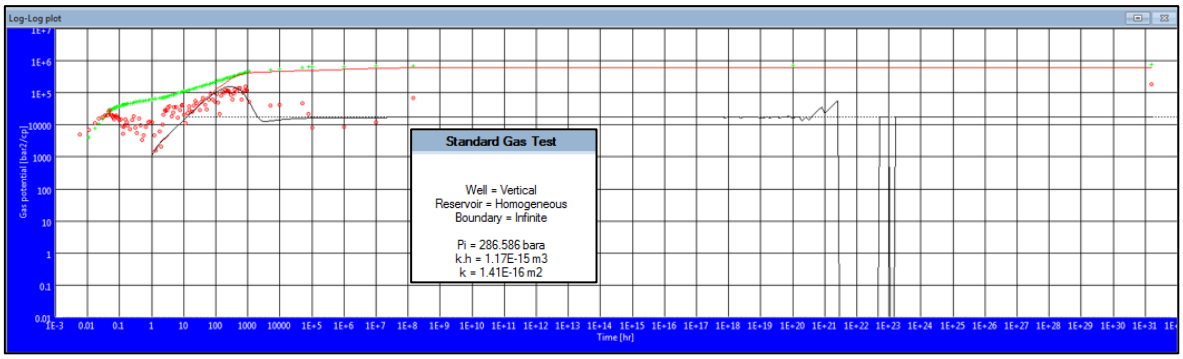
Nakon toga se prema jednadžbama (4.23) i (4.24) za VFHB računaju t_p i q_p:

$$t_p = t_{p(st\,var\,ni)} \times \left(10^6 \times 10^y\right) = 715,62 \times 10^5 h \tag{4.38}$$

i

$$q_p = \frac{q_{(st\,var\,ni)}}{\left(10^6 \times 10^y\right)} = \frac{954,86}{10^5} = 9,5 \times 10^{-3} m^3 / s \tag{4.39}$$

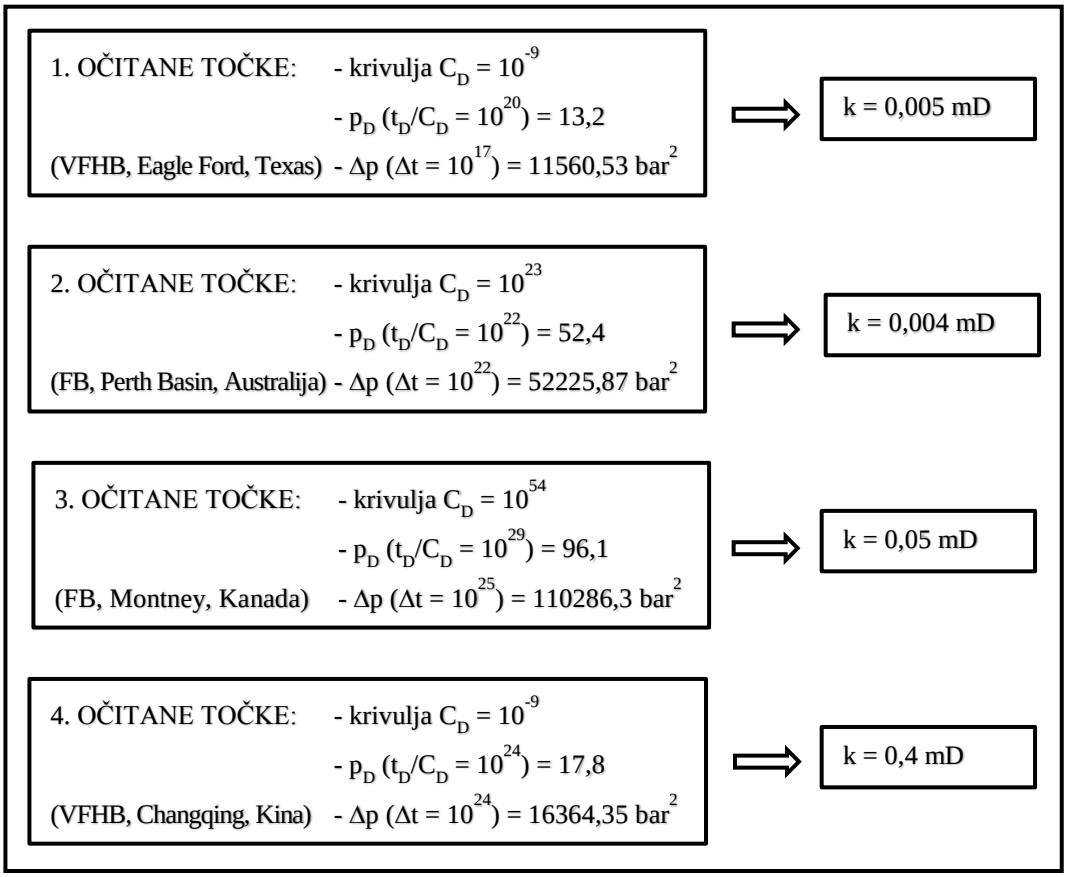
Kada se, sukladno opisanoj proceduri, prema ulaznim podacima provede analiza ovog testa porasta u programu Saphir (slika 113), dobiva se rezultat za propusnost stijene od 0,14 mD (1,4E-16 m^2). To je manja vrijednost nego kod primjene nove metode i rezultata dobivenog jednadžbom (4.37), ali je približno jednaka propusnosti iz originalnog rada od 0,2 mD. U opisu rezultata na slici 113 (engl. *Standard Gas Test*), uz osnovne pretpostavke o ležištu, također je dobiven i dobar rezultat o početnom ležišnom tlaku od 287 bara, što je samo nešto niža vrijednost od stvarnog, koji iznosi 294 bara. Modeliranjem u log-log dijagramu je postignuto da crvena linija aproksimira ulazne podatke mjerenog tlaka (zeleno) tek nakon perioda djelovanja ležišne barijere, koja je pojašnjena uz sliku 107, a koja je uzrokovana izrazito malom debljinom ležišta. Crna linija modela se iz istog razloga s nešto manjom točnošću preklapa s crveno označenim derivacijama tlaka u prvom dijelu testa porasta, ali je značajno da je program i ovdje prepoznao krajnji pseudo-radijalni protok u periodu od 1E+23 sati. U usporedbi s rezultatom nove metode, gdje se na slici 110 vidi da bi do ovog oblika protoka došlo nakon 1E+20 sati, može se zaključiti kao i u svim prethodnim primjerima, da je metoda pouzdana, jer su u oba slučaja izračunate približno jednake vrijednosti propusnosti.



Slika 113: Log-log dijagram i rezultati analize testa porasta tlaka u programu Saphir, ležište Changqing

5.3. Usporedba novih rezultata s originalnim vrijednostima propusnosti stijene

Na slici 114 su prikazani rezultati sva četiri analizirana testa porasta tlaka, koji su izvedeni u bušotinama slabo propusnih plinskih ležišta, navedenih u tablici 25. Rezultati očitanja za prvi test, koji je proveden u VFHB na ležištu šejla, izdvojeni su sa preklopljenih dijagrama testa porasta i modificiranog dijagrama, prikazanih u (slika 87). Iz ovog testa je, temeljem podudarnog tlaka, $(p_D/\Delta p)_M$, i modificirane jednadžbe (4.25) za određivanje propusnosti, izračunata propusnost od 0,005 mD (5E-18 m^2). Analogno tome, za drugi analizirani test, izmjeren u FB ležišta pješčenjaka, također su izdvojeni rezultati očitanja s preklopljenih dijagrama testa porasta i modificiranog dijagrama, prikazani na slici 97. Temeljem podudarnog tlaka i modificirane jednadžbe (4.29), rezultirajuća propusnost stijene za ovaj test je 0,004 mD. Rezultati očitanja za treći test odnose se također na FB u ležištu pješčenjaka, a izdvojeni su sa preklopljenih dijagrama testa porasta i modificiranog dijagrama iz slike 104. Izračunata propusnost za podudarni tlak dana je modificiranom jednadžbom (4.33) i iznosi 0,05 mD. Kao četvrti test analizirana je VFHB, također u ležištu pješčenjaka. Očitane točke nalaze se na preklopljenim dijagramima na slici 111. Rezultirajuća propusnost od 0,4 mD određena je iz podudarnog tlaka i jednadžbe (4.37).



Slika 114: Rezultati preklapanja dijagrama za 4 testa porasta i izračunate propusnosti stijene

Rezultati izračunate propusnosti stijene prema novoj metodologiji, prikazani su na slici 114 za sva četiri analizirana testa porasta tlaka u raznim tipovima bušotina slabo propusnih plinskih ležišta. Ove računate vrijednosti propusnosti stijene su u tablici 41 uspoređene s originalnim vrijednostima propusnosti, objavljene u radovima ranije spomenutih autora.

Tablica 41: Usporedba novih i originalnih vrijednosti propusnosti stijene

TESTOVI PORASTA TLAKA	**PROPUSNOST STIJENE, *k* (mD), (x 10^{-15} m^2)**	
(bušotina, slabo propusno ležište)	NOVA METODA	VRIJEDNOST IZ ORIGINALNOG RADA
1. VFHB, Eagle Ford (šejl)	**0,005**	**0,006**
2. FB, Perth Basin (pješčenjak)	**0,004**	**0,006**
3. FB, Montney (pješčenjak)	**0,05**	**0,05**
4. VFHB, Changqing (pješčenjak)	**0,4**	**0,2**

Pouzdanost rezultata nove metodologije za određivanje propusnosti stijene optimiranjem trajanja testa porasta tlaka, koji su zajednički prikazani na slici 114 i u tablici 41, analizirana je u diskusiji rezultata. Temeljem vrlo malih odstupanja računatih vrijednosti u usporedbi s originalnim vrijednostima propusnosti stijene, je prvenstveno dokazano da se trajanje testa u bušotinama slabo propusnih ležišta može minimizirati analizom testa porasta tlaka, što je jedna od hipoteza rada. Dokaz proizlazi iz činjenice da se primjenom prvog dijela nove metode u sva četiri analizirana testa, pojava pseudo-radijalnog protoka može procijeniti temeljem mjerenja tlaka od samo sto sati. Točnošću navedenih rezultata je dokazana glavna hipoteza rada da se analizom testa porasta tlaka u bušotinama slabo propusnih ležišta može pouzdano procijeniti propusnost stijene. Ona također slijedi i iz primjene drugog dijela metode. Odavde isto tako proizlazi i dokaz hipoteze da se konvencionalne metode za analizu testa porasta tlaka mogu prilagoditi za primjenu u nekonvencionalnim plinskim ležištima u svrhu određivanja potrebnog trajanja testa porasta.

U posljednjoj tablici rada (tablica 42) uspoređeni su rezultati nove metode za četiri analizirana testa porasta s rezultatima iste metode prilagođene za uporabu u programu Saphir, s pomoću efektivnog radijusa bušotine i modificiranih jednadžbi za ulazno vrijeme i protok, ovisno o tipu bušotine. Vrijednosti izračunatih i modelom dobivenih propusnosti stijene također su diskutirane u sljedećem poglavlju.

Tablica 42: Usporedba rezultata nove metode s primjenom metode u programu Saphir

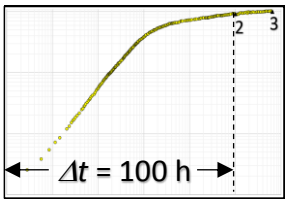
TESTOVI PORASTA TLAKA	**PROPUSNOST STIJENE, *k* (mD), (x 10^{-15} m^2)**	
(bušotina, slabo propusno ležište)	NOVA METODA	PRIMJENA METODE U SOFTVERU
1. VFHB, Eagle Ford (šejl)	**0,005**	**0,004**
2. FB, Perth Basin (pješčenjak)	**0,004**	**0,004**
3. FB, Montney (pješčenjak)	**0,05**	**0,06**
4. VFHB, Changqing (pješčenjak)	**0,4**	**0,14**

S obzirom na točnost rezultata dobivenih softverom u odnosu na vrijednosti propusnosti računate novom metodom, također proizlazi da su dokazane sve navedene hipoteze rada.

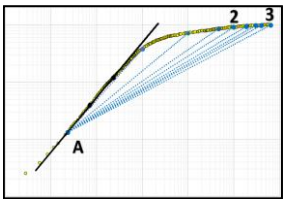
Na posljednjoj slici 115 su, kao poveznica cijelog rada, zajednički prikazani svi ključni koraci razvoja i primjene cjelokupne metode za određivanje propusnosti stijene.

I. DIO RAZVOJA METODE:

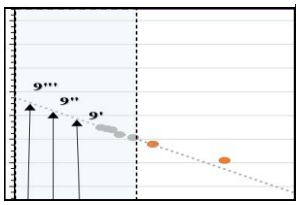
1. minimalno vrijeme od **100 sati** trajanja testa



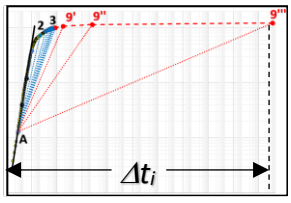
2. pravci kroz ključne točke na krivulji porasta tlaka



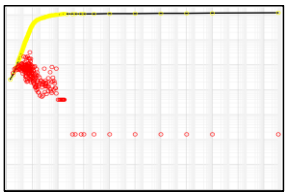
3. dijagram za određivanje nagiba pravaca



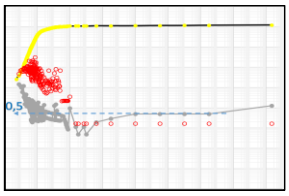
4. nepoznato područje porasta do 9''' (p_i, Δt_i)



5. ekstrapolacije krivulja do početnog tlaka, p_i

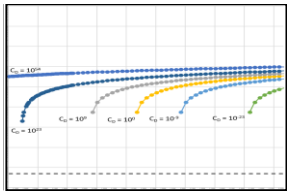


6. pseudo-radijalni protok i derivacija na konstanti 0,5



II. DIO RAZVOJA METODE:

1. modificirani Bourdet log-log dijagram



2a) i b) modificirane jednadžbe za propusnost stijene u višestruko frakturiranoj horizontalnoj i frakturiranoj bušotini

$$k = \frac{q}{10^5 \times 10^y} \times K_1 \times \left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_M = \frac{q}{10^5 \times 10^y} \times \frac{2p_{sc}\mu ZT}{T_{sc}\pi h} \times \left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_M$$

$$k = \frac{q}{10^3 \times 10^{-y}} \times K_1 \times \left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_M = \frac{q}{10^3 \times 10^{-y}} \times \frac{2p_{sc}\mu ZT}{T_{sc}\pi h} \times \left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_M$$

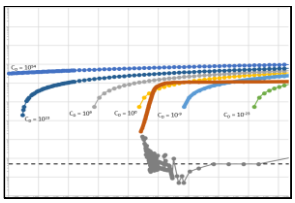
3a), b) i c) prilagodba metode za VFHB u programu Saphir

$$t_p = t_{p(stvarni)} \times \left(10^5 \times 10^y\right)$$

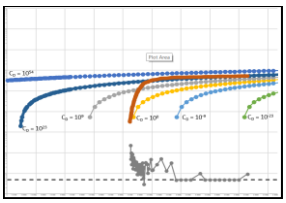
$$q_p = \frac{q_{(stvarni)}}{10^5 \times 10^y} \quad r'_{wD} = \frac{r'_w}{r_f}$$

III. DIO: REZULTATI METODE NA ČETIRI TESTA PORASTA TLAKA

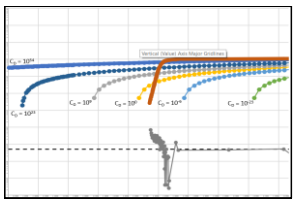
1a) preklapanje dijagrama za **VFHB** (Eagle Ford, Texas)



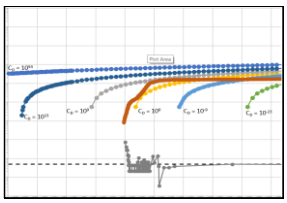
2a) preklapanje dijagrama za **FB** (Perth Basin, Australija)



3a) preklapanje dijagrama za **FB** (Montney, Kanada)



4a) preklapanje dijagrama za **VFHB** (Changqing, Kina)



1b) izračun propusnosti

$$\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_M = \frac{13,2}{11560,53}\,bar^{-2} = 1,14 \times 10^{-13}\,Pa^{-2}$$

k = 0,005 mD

2b) izračun propusnosti

$$\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_M = \frac{52,4}{52225,87}\,bar^{-2} = 1 \times 10^{-13}\,Pa^{-2}$$

k = 0,004 mD

3b) izračun propusnosti

$$\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_M = \frac{96,1}{110286,3}\,bar^{-2} = 8,7 \times 10^{-14}\,Pa^{-2}$$

k = 0,05 mD

4b) izračun propusnosti

$$\left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_M = \frac{17,8}{16364,35}\,bar^{-2} = 1,087 \times 10^{-13}\,Pa^{-2}$$

k = 0,4 mD

1c) primjena softvera Saphir

k = 0,004 mD
za
$r_w' = 641,7$ m

2c) primjena softvera Saphir

k = 0,004 mD
za
$r_w' = 11,45$ m

3c) primjena softvera Saphir

k = 0,06 mD
za
$r_w' = 5$ m

4c) primjena softvera Saphir

k = 0,14 mD
za
$r_w' = 122$ m

Slika 115: Ključni koraci i rezultati nove metodologije za određivanje propusnosti stijene optimiranjem trajanja testa porasta tlaka, u plinskim bušotinama slabo propusnih ležišta

6. DISKUSIJA REZULTATA

U doktorskom radu su analizirani testovi porasta tlaka stimuliranih plinskih bušotina u slabo propusnim ležištima šejlova i pješčenjaka, temeljem kojih je razvijena nova metodologija za pouzdano određivanje propusnosti stijene. U plinskim bušotinama slabo propusnih ležišta je dolazilo do odstupanja rezultata u određivanju propusnosti, jer standardnu metodu neograničeno djelujućeg radijalnog protoka u analizi testova porasta tlaka nije moguće pouzdano primijeniti, bez razvoja nove metodologije. Kod ležišta dobre propusnosti je rješenje ovog problema jednostavno, jer je mjerenje tlaka od maksimalno tri dana dovoljno za određivanje pseudo-radijalnog oblika protoka i točnosti izračunate propusnosti, dok bi u nekonvencionalnim ležištima trajanje testa za postizanje ovog oblika protoka trebalo biti i do nekoliko godina.

Stoga su u radu istraženi i suvremeni pristupi za analizu slabo propusnih plinskih ležišta, provedeni u raznim tipovima stimuliranih bušotina. Međutim, oni su i dalje u istraživačkoj fazi, jer ne nude postizanje rezultata općom metodom, primjenjivom na svim ležištima. Nova metoda je izvedena sa svrhom postizanja pouzdanih rezultata u određivanju propusnosti stijene upravo na osnovu jedinstvenog pristupa u analizi testova porasta tlaka svih slabo propusnih ležišta. U skladu s razvojem bazičnih proizvodnih modela, ona je također prvo postavljena za idealan slučaj, bez utjecaja bušotinskih efekata tj. bez utjecaja eventualnih odstupanja. Pritom se izvedene jednadžbe temelje na idealnim pretpostavkama o svojstvima ležišta i ležišnog fluida.

Novom metodologijom se najprije određuje optimalno vrijeme testa porasta tlaka, s pomoću kojeg su odstupanja rezultata analize testa minimalna. Time je postignut cilj da se i u slabo propusnom ležištu, temeljem samo četverodnevnog mjerenja tj. ispitivanjem od približno 100 sati propusnost ležišta može pouzdano odrediti, u bilo kojem tipu stimulirane bušotine. Ovaj cilj je postignut rezultirajućom ekstrapolacijom krivulje porasta tlaka sve do krajnjeg slučaja u kojem bi test trajao do potpunog izjednačavanja tlaka u ležištu. Na taj način je dokazano u kojem vremenu bi nastupio pseudo-radijalni protok u bušotini, čime je omogućena prilagodba postojećih metoda za analizu testa porasta tlaka, koje se odnose na tipske krivulje i derivaciju tlaka. Svrha metode je jedinstvena i pouzdana primjena, bez potrebe za dugim periodom mjerenja, što do sada nije bilo moguće postići niti jednom metodom.

U radu je, temeljem točnosti rezultata za propusnosti ležišnih stijena, dokazana hipoteza istraživanja da se konvencionalne metode za analizu testa porasta mogu prilagoditi

za primjenu u nekonvencionalnim ležištima plina u svrhu određivanja optimalnog trajanja ispitivanja bušotine. Minimalno trajanje testa porasta tlaka slabo propusnih ležišta, kao rezultat istraživanja, značajno će doprinijeti točnosti primjene proizvodnih modela. Osim toga, minimalno trajanje testa pospješit će i kvalitetniju procjenu ekonomske isplativosti cjelokupnog ciklusa proizvodnje plina, te omogućiti veći broj ispitivanja slabo propusnih ležišta.

Metoda je razvijena na testu porasta tlaka VFHB, provedenog u plinskoj bušotini, koja se nalazi u slabo propusnom ležištu šejla Eagle Ford, u Texasu. Kao ordinata testa porasta u log-log dijagramu je odabran parametar razlike između kvadrata mjerenog tlaka i kvadrata početnog tlaka testa porasta, jer je kao rezultat dokazano da ovaj oblik ima najviše prednosti u odnosu na ostale parametre. Iz ovako postavljenog početnog dijagrama jasno je da se metodu može prilagoditi i testovima porasta u slabo propusnim naftnim ležištima. U tom slučaju bi na ordinati bio isti parametar, ali kao što je uobičajeno u praksi ispitivanja naftnih bušotina, to ne bi bila razlika kvadrata tlakova, nego samo razlika istih tlakova, pa bi stoga i jedinica na ordinati bila bar, a ne bar^2.

Odabrani test porasta trajao je punih 27 dana (643 sati), jer se time očekivalo da će biti omogućen uvid na koji način krivulja porasta tlaka ulazi u područje stabilizacije, barem za jedno slabo propusno ležište. Stoga je razvoj metode išao u smjeru pronalaska novog pristupa, koji bi rezultirao pouzdanim prognoziranjem početka područja stabilizacije tlaka u slučaju kada je krivulja porasta tlaka, kao i kod konvencionalnih ležišta, mjerena samo do četvrtog dana. U prvom koraku su postavljene ključne točke na krivulju porasta, na tzv. optimalnim vremenima nakon zatvaranja bušotine, što metodu čini dodatno prihvatljivom za izvođenje, radi jednostavnosti. Za prvo optimalno vrijeme uzeto je trajanje od četiri dana, odnosno približno 100 sati. Glavni razlog radi kojeg nije preporučljivo da on traje kraće, je mogućnost da u slabo propusnom ležištu tlak na log-log dijagramu testa porasta još nije izašao iz tzv. područja skladištenja fluida, pa matematički izvodi ne bi vrijedili. Osim toga, test u bušotini nekog slabo propusnog ležišta može trajati i dulje od četiri dana, ali to nije optimalno s ekonomskog aspekta, jer razvijena metoda kao rezultat nudi pouzdano predviđanje tlaka u kasnijim vremenima, već i na osnovu četverodnevnog mjerenja. Sljedeća ključna točka je zadnja izmjerena točka odabranog testa, koji je trajao približno mjesec dana, ali je metoda razvijana s ciljem da se može primijeniti upravo kada tlak u ovom periodu nije poznat.

U drugom koraku se postavlja pomoćna točka na početku periodu skladištenja fluida, iz koje se povlače pravci koji povezuju odabrane točke na krivulji porasta u log-log

dijagramu. Rezultati njihovih nagiba su neophodni u daljnjim koracima metode kod određivanja trajanja porasta tlaka za postizanje početnog ležišnog tlaka, što je originalni doprinos metode. U ovom koraku je dokazano da se najtočniji rezultat za procjenu početnog tlaka dobiva ako je položaj pomoćne točke na početku perioda skladištenja. Iako već postoje poznate metode za određivanje početnog ležišnog tlaka, ovaj novi način je neophodan radi poveznice s proračunima svih tlakova u kasnijoj fazi testa, za čije određivanje ne postoji jedinstvena metoda u slabo propusnim ležištima.

Nadalje su programom Excel određene jednadžbe potencije za pravce postavljene u log-log dijagramu, iz kojih su očitani njihovi nagibi, te im je pridružena vrijednost razlike kvadrata tlakova. Pritom se prvi nagibi odnose na pravce postavljene do dijela krivulje porasta svakog budućeg četverodnevnog testa, a ostali rezultirajući nagibi se odnose na tzv. nepoznato područje krivulje, koje je u odabranom testu porasta za plinsku bušotinu na ležištu šejla Eagle Ford poznato, jer je mjerenje trajalo do 27. dana. U trećem koraku se nagibi i razlike tlakova unose u dijagram iz kojeg se modeliranjem parametara linearne jednadžbe, dolazi do zakonitosti s pomoću koje je moguće odrediti nagibe za tlakove u nepoznatom području testa porasta. Istraživanjem ovog modeliranja je najprije postavljena linearna jednadžba za ovisnost nagiba i tlakova u poznatom području testa. Zatim je određena jednadžba koja zajedno obuhvaća i poznato i nepoznato područje, na osnovu koje je postignuta konačna jednadžba u kojoj je isključeno poznato područje, te se dobivaju rezultati ovisnosti nagiba i tlakova za cijelo nepoznato područje. Točnost rezultirajuće jednadžbe leži u činjenici što se nulti nagib poklapa s početnim ležišnim tlakom na dijagramu, čime je omogućena ekstrapolacija cijele krivulje porasta tlaka do krajnje točke. Glavna prednost ovog koraka metode je činjenica da se temeljem četverodnevnog mjerenja mogu odrediti nagibi pravaca za svaki budući test skroz do početnog ležišnog tlaka, bez čega cjelokupnu metodu ne bi bilo moguće provesti. Stoga je točnost rezultirajućih nagiba važan doprinos ovog dijela metode.

U četvrtom koraku se postavljaju ekstrapolirane točke uzduž nepoznatog dijela krivulje porasta, gdje su, kao novi doprinos, grafo-analitičkim putem izvedene dvije jednadžbe s pomoću kojih se određuju vremena u kojima bi došlo do tlakova, izračunatih s pomoću nagiba u prethodnom koraku. Bez ovog doprinosa koji rezultiraju u točnosti određenih vremena testa porasta, metoda također ne bi bila provediva. Nakon toga je optimalno ekstrapolirana cijela krivulja skroz do krajnjeg tlaka, tako što je predviđeno da se njen rast u području stabilizacije tlaka može aproksimirati segment po segment, blagim nagibima jednadžbi potencije. Svrha ovog koraka je, temeljem ekstrapolirane krivulje

porasta, dobiti potpuni uvid i u promjenu nagiba njene derivacije u nepoznatom području testa porasta, što je krajnji rezultat prvog dijela metode. U konačnici je dokazano da bi u ovom ležištu teoretski došlo do pseudo-radijalnog protoka nakon približno 5,7 godina testa porasta tlaka, koji bi trajao skroz do izjednačavanja tlaka u ležištu tj. da u bušotini ne bi došlo do polu-stacionarnog stanja. Osim toga, nagibi krivulje derivacije su najprije analizirani segment po segment, te je ustanovljeno da se prije pojave pseudo-radijalnog protoka ne može pouzdano odrediti niti jedan od oblika protoka, na kojem se temelje metode testova porasta u konvencionalnim ležištima, kao i suvremeni pristupi rješavanja testova porasta u nekonvencionalnim ležištima nafte i plina. Stoga je zaključeno da se propusnost slabo propusnog plinskog ležišta može pouzdano odrediti samo ako je rezultirajuće trajanje testa porasta tlaka optimirano putem šest dokazanih koraka u prvom dijelu razvoja metode. Time je ispunjen preduvjet za drugi dio metode tj. za prilagodbu metoda tipskih krivulja i derivacije tlaka. Ovdje su kroz nekoliko modifikacija uspješno izvedene jednadžbe za određivanje propusnosti u slabo propusnim plinskim ležištima za frakturirane (FB) i višestruko frakturirane horizontalne bušotine (VFHB).

Kod prilagodbe metoda je najprije modificiran Bourdet log-log dijagram tako što je prilagođena apscisa, na kojoj se nalazi bezdimenzionalna grupa, t_D/C_D, a zatim ordinata, na kojoj su bezdimenzionalni tlak, p_D, i derivacija tlaka, dana kao umnožak, $(t_D/C_D)*p_D'$. Krivulje na dijagramu su funkcionalno ovisne o bezdimenzionalnoj konstanti skladištenja, C_D, te je unesen referentni iznos konstante derivacije od 0,0005, jer se ovaj rezultat u istraživanju pokazao jedinstvenim kod postupka preklapanja s log-log dijagramom testova porasta u slabo propusnim ležištima. Tu je također bilo potrebno uvesti dodatan, precizan uvjet za pseudo-radijalni protok, da se derivaciju razlike tlakova pomnoži s proteklim vremenom, te da njene vrijednosti unutar pseudo-radijalnog protoka padaju na rezultirajuću konstantu od 0,5 kod log-log dijagrama mjerenih podataka. Ovaj uvjet postignut je kao rezultat i u odabranom test i u ostalim testovima na kojima je metoda uspješno provedena i dokazana. Nakon toga se očitavaju podudarne točke s oba dijagrama, odakle se dobiva rezultirajući, podudarni tlak, $(p_D/\Delta p)_M$. Točnost preklapanja i veća pouzdanost primjene nove metode postiže se u slučaju kada se dio krivulje porasta što dulje pruža uzduž odabrane krivulje, C_D, i to u unutar perioda trajanja pseudo-radijalnog protoka. Modificirani log-log dijagram za analizu testa porasta tlaka slabo propusnih plinskih ležišta se može koristiti jedino uz modifikaciju jednadžbi za određivanje propusnosti, koje su izvedene za VFHB i za FB.

U skladu s time su razvijene i nove ulazne jednadžbe za vrijeme konstantnog protoka i za iznos konstantnog protoka kod primjene metode u programu Saphir. Temeljem ovih prilagodbi se i u softveru dobivaju pouzdani rezultati za propusnost stijene, što prije primjene nove metodologije također nije bilo izvedivo. S obzirom da se u modificiranoj jednadžbi za određivanje propusnosti, stvarni protok kod VFHB dijeli s neovisnom konstantnom, vrijeme konstantnog protoka potrebno je pomnožiti s istom konstantom. Na taj način umnožak protoka i vremena i dalje ostaje isti, ali je vrijeme povećano, čime je stvoren i nužan preduvjet za postizanje uvjeta pseudo-radijalnog protoka i prije zatvaranje bušotine. Prilagodba nove metode za primjenu u Saphiru bazira se i na primjeni efektivnog radijusa bušotine kojeg je moguće izračunati za svaki tip stimulirane bušotine. Tada se svaku stimuliranu bušotinu može analizirati ekvivalentno vertikalnoj bušotini, s radijusom jednakim efektivnom radijusu.

Dobiveni rezultat za propusnost stijene primjenom nove metode u analiziranoj bušotini ležišta Eagle Ford je 0,005 mD (5E-18 m^2), što je gotovo identično propusnosti iz rada Lougheeda i suradnika, koja odgovara laboratorijski određenoj vrijednosti propusnosti stijene od 0,006 mD. Isti primjer analiziran je primjenom nove metode u softveru, te je dobiven gotovo sličan rezultat od 0,004 mD, čime je pouzdanost razvijene metode u potpunosti potvrđena, te je nakon toga uspješno primijenjena na još tri različita testa porasta u slabo propusnim plinskim ležištima.

Za razliku od razvoja metode, gdje je kao prvi analiziran test u VFHB šejla, nova metoda je najprije primijenjena u frakturiranoj bušotini pješčenjaka (Perth Basin, Australija). S obzirom na uspješnu provedbu svih koraka, dokazano je da metoda vrijedi i u ležištima slabo propusnih pješčenjaka i za frakturirane bušotine. Zatim je za isti slučaj FB u pješčenjaku analiziran još jedan test porasta (Montney, Kanada), te je metoda po treći puta uspješno provedena. Konačno, kao četvrti primjer odabrano je ponovno ležište slabo propusnog pješčenjaka, ali s testom u VFHB (Changqing, Kina), te se uvidjelo da se izvedena metoda i za ovaj tip stimulirane bušotine može primijeniti i u pješčenjacima.

U svim testovima je najprije provedeno prvih šest koraka metode, čime su rezultirajuće krivulje porasta optimalno ekstrapolirane do početnog ležišnog tlaka, odnosno do početka polu-stacionarnog stanja u bušotini. Zatim je u svakom primjeru postavljena krivulja njene derivacije, te je kod svakog primjera ispunjen uvjet da dolazi do pseudo-radijalnog protoka, gdje je njena rezultirajuća vrijednost jednaka konstanti od 0,5. Nakon toga je za svaki test određen rezultirajući, podudarni tlak, preklapanjem s modificiranim Bourdet log-log dijagramom. Na osnovu njega su primjenom modificiranih izraza, određeni

rezultati za propusnosti stijene u svakom analiziranom ležištu, koji su također uspješno provjerene i primjenom metode u programu Saphir. Usporedba rezultata dobivenih novom metodom i originalnih vrijednosti propusnosti stijene nalazi se u tablici 41, a u tablici 42 je dana usporedba rezultata nove metode i njene primjene u softveru. U ležištu Perth Basin je novom metodom određen iznos propusnosti od 0,004 mD, što je nešto manje u odnosu na objavljenu vrijednost od 0,006 mD, ali još uvijek s prihvatljivim odstupanjem u rangu od 0,001 mD ili 1E-18 m^2. Kod ležišta Montney dobivena je ista propusnost od 0,05 mD kao i u originalnom radu. U posljednjem primjeru za ležište u Kini je primjenom nove metode izračunata vrijednost propusnosti stijene od 0,4 mD, što je nešto više u odnosu na iznos od 0,2 mD. Iz točnosti ovih rezultata se može zaključiti da se nova metodologija za određivanje propusnosti optimiranjem trajanja testa porasta tlaka može pouzdano primijeniti na svim stimuliranim bušotinama u svim slabo propusnim ležištima.

Pouzdanost primjene nove metode se prvenstveno odnosi na značenje ranga odstupanja u određivanju propusnosti stijene testovima porasta u konvencionalnim ležištima, gdje se ona uvijek analizira i uspoređuje s nekoliko metoda. Dakle, i kod dobro propusnih ležišta, gdje je i metodologija i njena primjena u softveru razvijena do maksimalne točnosti, dolazi do manjih odstupanja rezultata analize, jer su oni približno jednakih, ali ne i istih vrijednosti. Zadovoljavajuća točnost tj. pouzdanost rezultata ne iskazuje se u postotku odstupanja, nego u rangu odstupanja, jer se propusnost izražava u jedinici mD, odnosno u 10^{-18} m^2. To znači da se kod ekstremno slabo propusnih ležišta, kao što je primjerice Eagle Ford s 6E-18 m^2 (0,006 mD), pouzdanim rezultatom smatraju vrijednosti u rangu od 1E-18 m^2 do 9E-18 m^2. Nepouzdanom rezultatom bi se u ovom slučaju podrazumijevali iznosi koji bi bili većeg ili manjeg ranga od 10^{-18} m^2, odnosno koji bi rezultirali jediničnim vrijednostima propusnosti pomnožene s 10^{-17} m^2 ili s 10^{-19} m^2. Za svaki od četiri analizirana testa porasta tlaka novom metodom, dobiveni rezultati za propusnost stijene su unutar dozvoljenog ranga odstupanja, odakle se može zaključiti da je točnost metode dovoljna kako bi bila primjenjiva i na ostalim stimuliranim bušotinama slabo propusnih ležišta.

Osim toga, nova metoda pokazala se pouzdanom za primjenu i u programu Saphir, jer su u sva četiri analizirana testa dobiveni vrlo slični rezultati kao i kod određivanja novom metodom (tablica 42). Za FB ležišta Perth Basin je s obje metode postignut isti rezultat od 0,004 mD, dok se u FB ležišta Montney rezultat dobiven softverom od 0,06 mD neznatno razlikuje od vrijednosti 0,05 mD, izračunate novom metodom. U VFHB ležišta Changqing rezultat nove metode je 0,4 mD, a softverom dobiven rezultat iznosi 0,14 mD, što je nešto niža vrijednost, koja je i dalje u rangu dovoljne točnosti. To znači da je i kod primjene

softvera postignut zadovoljavajući rang odstupanja rezultata u svim izračunatim vrijednostima propusnosti. Odavde se također može zaključiti da je točnost rezultata i drugog dijela metode dovoljna kako bi bila primjenjiva i na ostalim stimuliranim bušotinama slabo propusnih ležišta.

Nadalje, pouzdanost nove metodologije, osim u diskutiranoj točnosti rezultata leži i u adekvatnoj primjeni svih ključnih koraka metodologije opisanih prethodno, bez kojih ne bi bilo niti dobivenih rezultata. Svi oni zajedno, sažeto su prikazani na posljednjoj slici rada (slika 115). Prvi dio metode obuhvaća šest koraka koji putem izvedenih jednadžbi omogućuju pouzdanu ekstrapolaciju krivulje porasta tlaka do početnog ležišnog tlaka. To znači da je metoda pouzdana ukoliko su ovi uvjeti ispunjeni, odnosno ako je trajanje testa porasta tlaka optimirano. Ukoliko u bušotini ne dolazi do oblika pseudo-radijalnog protoka, metodu nije moguće sprovesti. Osim toga, velika prednost prvog dijela metode je dokaz na sva četiri testa porasta, da se ekstrapolaciju krivulje do krajnje točke može pouzdano provesti za optimalno trajanje testa od samo sto sati. Time je ispunjen i jedan od ciljeva doktorskog rada da se i nekonvencionalna ležišta mogu pouzdano analizirati kratkim testovima porasta tlaka. Prije razvoja nove metodologije to nije bilo moguće, a ova činjenica mogla bi utjecati na široku primjenu izvođenja i analiziranja testova porasta u svim slabo propusnim ležištima.

Pouzdanost primjene ostalih koraka metode, prikazanih sažeto na istoj slici 115, je i u postizanju rezultirajućeg preklapanja krivulja modificiranog Bourdet dijagrama s krivuljama porasta i njihovim derivacijama na log-log dijagramu. S obzirom na točnost rezultata, proizlazi da su i ova preklapanja krivulja dovoljno pouzdano provedena u sva četiri testa, a točke očitanja su sumarno prikazane i na slici 114. Odavde slijedi da se modificirani Bourdet dijagram za slabo propusna ležišta s dovoljnom točnošću može primijeniti na svim stimuliranim bušotinama, jer je dokazano da sve rezultirajuće krivulje za preklapanje, C_D, u iznosima od 10^{-9} do 10^{54} daju pouzdane rezultate. Osim toga, očitani bezdimenzionalni tlakovi, p_D, na različitim vrijednostima apscise bezdimenzionalne grupe, t_D/C_D, također su primjenjivi u praksi, s obzirom na dobivene rezultate propusnosti u sva četiri testa porasta. Isto tako, kao spoj prvog i drugog dijela metode pouzdanim se mogu uzeti i očitane tj. izračunate podudarne točke za razlike kvadrata tlakova, Δp, unutar trajanja testa porasta tlaka, Δt, u području pseudo-radijalnog oblika protoka, svakog analiziranog testa.

U pogledu jednoznačnosti primjene nove metode, važna je i rezultirajuća točnost modificiranih jednadžbi za određivanje propusnosti stijene, temeljem podudarnih tlakova. Iako one daju mala odstupanja rezultata u sve četiri analize, a isto vrijedi i za prilagođene jednadžbe u softveru, potpuna primjenjivost metodologije biti će dokazana ukoliko ovaj

pristup bude prihvaćen za analizu ostalih testova, čiji rezultati bi bili objavljeni u novim radovima. Stoga se cjelokupna metodologija može smatrati pionirskim pokušajem i originalnim doprinosom u postizanju onoga što se do sada u literaturnim izvorima smatralo nemogućim, a to je pouzdano određivanje propusnosti stijene analizom kratkih testova porasta tlaka u slabo propusnim ležištima.

7. ZAKLJUČCI

- Razvojem nove metodologije za određivanje propusnosti stijene analizom testova porasta tlaka u slabo propusnim plinskim ležištima, ostvaren je cilj doktorskog rada. Istraživanje se temelji na mjerenjima tlaka stimuliranih plinskih bušotina u ležištima šejlova i pješčenjaka. Analizu ovih testova nije bilo moguće provesti primjenom standardne metode neograničeno djelujućeg radijalnog protoka, jer bi ispitivanje slabo propusnih ležišta trebalo trajati čak i do nekoliko godina. Cilj nove metode je postignut određivanjem optimalnog vremena trajanja testa porasta tlaka i njegovog utjecaja na pouzdanu procjenu propusnosti stijene. Optimiranjem trajanja testa je omogućeno da se i u slabo propusnim ležištima samo na osnovu četverodnevnog mjerenja može pouzdano odrediti njegova propusnost. U prvom dijelu metode je kroz šest koraka ekstrapolirana krivulja porasta i njena derivacija u log-log dijagramu do tzv. nepoznatog područja krivulje, gdje teoretski dolazi do pseudo-radijalnog oblika protoka. Ovdje je kao cilj postavljen i uvjet, da kraćim trajanjem testa od približno sto sati, krivulju porasta tlaka nije moguće optimalno ekstrapolirati. Drugim dijelom metode obuhvaćena je modifikacija Bourdet dijagrama, temeljem efektivnog radijusa bušotine za pojedine tipove stimuliranih bušotina. Ovim korakom je omogućeno preklapanje s dijagramom mjerenih podataka i računanje podudarnog tlaka. Prilagođenim jednadžbama za određivanje propusnosti u stimuliranim bušotinama, u koje se uvrštava podudarni tlak, izračunata je propusnost na četiri različita slabo propusna ležišta. Odstupanja rezultata svakog analiziranog testa u frakturiranim i višestruko frakturiranim horizontalnim bušotinama su u prihvatljivom rangu, pa se iz svega navedenog može zaključiti kako:
  - je prva postavljena hipoteza: „*analizom testa porasta tlaka može se dovoljno pouzdano procijeniti propusnost slabo propusnog ležišta*“, potvrđena;
  - je druga postavljena hipoteza: „*analizom testa porasta tlaka može se minimizirati trajanje ispitivanja u bušotinama slabo propusnih plinskih ležišta“,* potvrđena;
  - je treća postavljena hipoteza: „*konvencionalne metode za analizu testa porasta mogu se prilagoditi za primjenu u nekonvencionalnim ležištima plina u svrhu određivanja potrebnog trajanja ispitivanja bušotine“,* potvrđena.
- Plin iz nekonvencionalnih ležišta je moguće crpiti pri ekonomičnom protoku i u ekonomičnim količinama jedino ako se bušotinu stimulira, pa je u skladu s time i nova metoda za određivanje propusnosti stijene razvijena za analizu testova porasta tlaka hidraulički frakturiranih i višestruko frakturiranih horizontalnih bušotina.

- Metoda se temelji na novom pristupu za pouzdano prognoziranje početka područja stabilizacije tlaka u slučaju kada je krivulja porasta tlaka, slično kao i kod konvencionalnih ležišta, mjerena približno samo 100 sati. U skladu s time se najprije postavlja pomoćna točka na početku periodu skladištenja fluida, iz koje se povlače pravci koji povezuju odabrane točke na krivulji porasta u log-log dijagramu. Njihovi nagibi su neophodni kod određivanja trajanja porasta tlaka za postizanje početnog ležišnog tlaka, što je originalni znanstveni doprinos metode, jer je ovakav pristup po prvi puta uspješno proveden.
- Ideja za postupak postavljanja pravaca koji povezuju ključne točke krivulje porasta je proistekla iz analogije s poznavanjem široke primjene toplinskih log-log (*T, s*)-dijagrama u energetici, uz pretpostavku da bi se i u log-log dijagramima testova porasta tlaka također moglo doći do novih rješenja, iz nagiba novih pravaca.
- U metodi su određene jednadžbe potencije za pravce postavljene u log-log dijagramu, iz kojih su očitani nagibi, te im je pridružena vrijednost razlike kvadrata tlakova s krivulje porasta. Nakon što se ovi nagibi i razlike tlakova unesu u novi lin-lin dijagram, određena je nova zakonitost s pomoću koje je moguće odrediti nagibe i u nepoznatom području testa porasta. Točnost konačne jednadžbe je u činjenici da se nulti nagib poklapa s početnim ležišnim tlakom, što omogućuje ekstrapolaciju cijele krivulje porasta tlaka do krajnje točke u log-log dijagramu. Bez ovog znanstvenog doprinosa cjelokupnu metodu ne bi bilo moguće provesti.
- S obzirom da se ekstrapolirane točke postavljaju uzduž nepoznatog dijela krivulje porasta, grafo-analitičkim putem su izvedene jednadžbe iz kojih se određuje trajanje testa u kojem bi došlo do tlakova izračunatih s pomoću nagiba u prethodnom koraku. I bez ovog doprinosa pri razvoju metode, ona također ne bi bila provediva.
- Cijela krivulja optimalno je ekstrapolirana tako što se njen blagi rast u području stabilizacije tlaka aproksimira s jednadžbama potencije. U dosadašnjim metodama nije postojalo rješenje za područje stabilizacije tlaka, jer nema podataka mjerenja, koja bi trajala predugo, te bi bila ekonomski neisplativa.
- Svrha određivanja ekstrapolirane krivulje porasta je izračunati i promjenu nagiba njene derivacije u tzv. nepoznatom području trajanja testa. U prvom analiziranom testu na odabranoj VFHB ležišta Eagle Ford, otkriveno je upravo ono do čega se i željelo doći u ovom području, a to je pojava pseudo-radijalnog protoka. Dokazano je da bi ovaj oblik protoka teoretski nastupio nakon približno 5,7 godina.

- Analizom nagiba krivulje derivacije je ustanovljeno da se prije pojave pseudo-radijalnog protoka ne može pouzdano odrediti niti jedan od oblika protoka, na kojem se temelje standardne metode testova porasta u konvencionalnim ležištima, kao i suvremeni pristupi u nekonvencionalnim ležištima. Poznato je da se kao prvi oblik očekuje linearni, nagiba krivulje u log-log dijagramu od ½, a tek kao posljednji nastupa pseudo-radijalni nagiba 0, pa je originalnost nove metode u odnosu na ostale pristupe, u usmjerenosti istraživanja na krajnji oblik protoka, jer se njegovom analizom mogu dobiti pouzdana rješenja za propusnost stijene.
- Iz svega slijedi da se propusnost slabo propusnog plinskog ležišta može odrediti ako je trajanje testa porasta tlaka optimirano putem koraka razvijenih u prvom dijelu nove metode. Na taj način je ispunjen preduvjet za prilagodbu metoda tipskih krivulja i derivacije tlaka u kojima su kroz nekoliko modifikacija uspješno izvedene jednadžbe za određivanje propusnosti u slabo propusnim plinskim ležištima.
- Kod prilagodbe ovih metoda, najprije je modificiran Bourdet log-log dijagram, gdje je kao ključni korak unesen referentni iznos konstante derivacije od 0,0005, koji se pokazao jedinstvenim kod postupka preklapanja s log-log dijagramom testova porasta u slabo propusnim ležištima. Osim toga, uveden je i dodatan uvjet za pseudo-radijalni protok, da derivacija krivulje porasta tlaka pada na konstantu od 0,5 kod log-log dijagrama mjerenih podataka. Ovaj uvjet postignut je i u odabranom test i u ostalim testovima na kojima je metoda uspješno provedena, pa se očitanjem podudarnih točaka preklapanjem oba dijagrama računa podudarni tlak.
- Nove jednadžbe za određivanje propusnosti, u koje se uvrštava podudarni tlak, su posebno određene za VFHB i za FB.
- Prilagodba metode za primjenu u softveru se bazira na primjeni efektivnog radijusa bušotine za svaki tip stimulirane bušotine, kao i na novim jednadžbama za vrijeme i protok prije zatvaranja bušotine. Stoga se svaku stimuliranu bušotinu u programu Saphir može analizirati ekvivalentno vertikalnoj bušotini, s radijusom jednakim efektivnom. To je dodatan znanstveni doprinos metode, jer se prije uvođenja ovih jednadžbi za nekonvencionalna ležišta, propusnost nije moglo softverski pouzdano odrediti.
- Rezultat za propusnost stijene u analiziranoj VFHB na ležištu Eagle Ford je 0,005 mD (5E-18 m^2), dok je iznos dobiven softverom također približan i iznosi 0,004 mD. Time je pouzdanost razvijene metode potvrđena, jer su odstupanja rezultata u prihvatljivom rangu za slabo propusna ležišta.

- Metoda je uspješno primijenjena na još tri različita testa porasta u slabo propusnim plinskim ležištima. Najprije je provedena u frakturiranoj bušotini pješčenjaka Perth Basin u Australiji, kao i u frakturiranoj bušotini pješčenjaka Montney u Kanadi, te na testu VFHB na ležištu pješčenjaka Changqing u Kini. Iznosi izračunatih propusnosti u ovim ležištima su 0,004 mD, 0,05 mD i 0,4 mD, što je gotovo identično originalnim vrijednostima iz objavljenih radova, odakle također slijedi potvrda glavna hipoteza rada.
- Pouzdanost primjene nove metode je i u dodatnoj činjenici da su vrijednosti propusnosti određene u softveru, približnih vrijednosti rezultatima dobivenim novom metodom, u svim analiziranim testovima porasta. Za ležište Perth Basin ona je 0,004 mD, za Montney je 0,06 mD, te za Changqing iznosi 0,14 mD, pa je i ovime dodatno potvrđena glavna hipoteza rada.
- Svrha metode je jedinstvena primjena na svim tipovima bušotina, na testovima porasta svih slabo propusnih plinskih ležišta, bez potrebe za dugim periodom mjerenja.
- Znanstveni doprinos rada je što se kao rezultat istraživanja postiže minimalno trajanje testa porasta tlaka slabo propusnih ležišta, koje će značajno doprinijeti i točnosti primjene proizvodnih modela.
- Minimalno trajanje testa porasta će također pospješiti procjenu ekonomske isplativosti cjelokupnog ciklusa proizvodnje plina, što je također znanstveni doprinos rada.
- S obzirom da će se minimalno trajanje testa porasta tlaka omogućiti i veći broj ispitivanja slabo propusnih ležišta, odavde slijedi i aplikativni doprinos rada. Ukupne, pridobive rezerve nekonvencionalnih ležišta plina procijenjene na više od 400×10^{12} m^3, što uključuje plin iz slabo propusnih pješčenjaka i šejlova, ali i metan iz ugljena, pa primjenjivost nove metode može imati vrlo široku primjenu u testovima porasta tlaka stimuliranih bušotina ovih ležišta.
- Značaj moguće primjene metode proizlazi i iz predviđanja Međunarodne agencije za energiju, da bi se do 2035. godine udio proizvodnje iz nekonvencionalnih ležišta u svjetskoj proizvodnji plina mogao povećati sa sadašnjih 14% na 24%. Pritom su vodeće zemlje u proizvodnji plina iz slabo propusnih ležišta SAD, Kanada, Kina i Australija, gdje su provedeni i testovi porasta tlaka s pomoću kojih je nova metoda za određivanje propusnosti stijene razvijena i dokazana.
- S ciljem povećanja pouzdanosti interpretacije rezultata svakog budućeg analiziranog testa u stimuliranim bušotinama slabo propusnih ležišta predlaže se:

- provjera točnosti i dostupnosti svih ulaznih podataka o ležištu, bušotini i testu porasta tlaka na kojem se provodi nova metodologija;
- detaljna primjena svih koraka metode, opsežno opisanih za tzv. etalonski primjer VFHB na ležištu šejla Eagle Ford, sa svrhom točne prilagodbe ulaznih parametara u cijelom postupku određivanja propusnosti stijene.

U Zagrebu, 29. kolovoza, 2018. ……...

(Mr. sc. Sonja Koščak Kolin, dipl. ing.)

8. LITERATURA

Agarval, R. G., Al-Hussainy, R., Ramey Jr., H. J. (1970): An Investigation of Wellbore Storage and Skin Effect in Unsteady Liquid Flow. SPE Journal, 10, 3, 279-290, Richardson.

Al-Hussainy, R., Ramey Jr., H. J., Crawford, P. B. (1966): The Flow of Real Gases Through Porous Media. Journal of Petroelum Technology, 18, 5, http://dx.doi.org/10.2118/1243-A-PA, 624-636, Richardson.

Antolović, S., Čikeš, M. (2009): Proizvodnost frakturiranih i horizontalnih bušotina. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 21, 35-46, Zagreb.

Awontunde, A. A., Horne, R. N. (2011): A Multiresolution Analysis of the Relationship Between Spatial Distribution of Reservoir Parameters and Time Distribution of Well-Test Data. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 14, 3, 345-356, Richardson.

Babu, D. K. & Odeh, A. S. (1988): Productivity of a Horizontal Well: Appendices A and B. Paper SPE 18334 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2-5.10.1988., 1-36, Houston.

Babu, D. K. & Odeh, A. S. (1989): Productivity of a Horizontal Well. SPE Reservoir Engineering, 4, 4, 1989, 417-421, Richardson.

Bahrami, H., Rezaee, M. R., Kabir, A., Siavoshi, J., Jammazi, R. (2010): Using Second Derivative of Transient Pressure in Welltest Analysis of Low Permeability Gas Reservoirs. Paper SPE 132475 presented at the SPE Production and Operations Conference and Exhibition, 8-10.6.2010., 1-9, Tunis.

Bahrami, H., Jayan, V., Rezaee, R., Hossain, M. (2012a): Welltest Analysis of Hydraulically Fractured Tight Gas Reservoirs: A Field Example from Perth Basin. APPEA Journal, 1-7, Melbourne.

Bahrami, H., Rezaee, R., Hossain, M. (2012b): Characterizing Natural Fractures Productivity in Tight Gas Reservois, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, Springer, 2, 2, doi: 10.1007/s13202-012-0026, 107-115, Berlin Heidelberg.

Bahrami, H., Rezaee, R., Clennell, B. (2012c): Water Blocking Damage in Hydraulically Fractured Tight Sand Gas Reservoirs: An Example from Perth Basin,Western Australia.

Journal of Petroleum Science and Engineering, Elsevier, 88-89, doi: 10.1016/j.petrol.2012.04.002, 100-106.

Bahrami, H., Siavoshi, J. (2013): Interpretation of Reservoir Flow Regim as an Analysis of Welltest Dana in Hydraulically Fractured Unconventional Oil and Gas Reservoirs. Paper SPE 164033 presented at the SPE Middle East Unconventional Gas Conference and Exhibition, 28-30.1.2013., Muscat.

Bahrami, N., Pena, D., Lusted, I. (2015): Well test, Rate Transient Analysis and Reservoir Simulation for Characterizing Multi-Fractured Unconventional Oil and Gas Reservoirs. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, Springer, 6, 4, doi 10.1007/s13202-015-0219-1, 675-689, Berlin Heidelberg.

Barree, R. D., Cox, S. A., Miskimins, J. L., Gilbert, J. V. Conway, M. W. (2015): Economic Optimization of Horizontal-Well Completions in Unconventional Reservoirs. SPE Production & Operations, 30, 4, 293-311, Richardson.

Bingxiang, X., Haghigh, M., Cooke, D. (2012): Production Data Analysis in Eagle Ford Shale Gas Reservoir. Paper SPE 153072 presented at the SPE/EAGE Unconventional Resources Conference and Exhibition, 20-22.3.2012., 1-12, Beč.

Bourdet, D., Ayoub, J. A., Pirard, Y. M. (1989): Use of Pressure Derivative in Well-Test Interpretation. SPE Journal of Formation Evaluation, 4, 2, 293-302, Richardson.

Bourdarot, G. (1998): Well Testing: Interpretation Methods. Center for Petroleum Engineering and Project Development, 333 str, Pariz.

Brown, M., Ozkan, E., Raghavan, R., Kazemi, H. (2009): Practical Solution for Pressure Transient Responses of Fractured Horizontal Wells in Unconventional Reservoirs. Paper APE 125043 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 4-7.10.2009., 1-18, New Orleans.

Budin, R. & Mihelić Bogdanić, A. (2002): Osnove tehničke termodinamike. Drugo izdanje, Školska knjiga, 550 str, Zagreb.

Buhidma, I. M., Habbtar, A., Rahim, Z. (2013): Practical Considerations for Pressure Transient Analysis of Multi-Stage Fractured Horizontal Wells in Tight Sands. Paper SPE 168096 presented at the SPE Saudi Arabia section Annual Technical Symposium and Exhibition, 19-22.5.2013., 1-8, Khobar.

Chen, C.-C. & Raghavan, R. (1997): A Multiply-Fractured Horizontal Well in a Rectangular Drainage Region. SPE Journal, 2, 4, 455-465, Richardson.

Cheng, Y. H. S., Li, S., Huang, Y., Qin, J., Hu, L., Yu, H. (2017): A Semianalytical Methodolgy to Diagnose the Locations of Underperforming Hydraulic Fractures Through Pressure-Transient in Tight Gas Reservoir. SPE Journal, 22, 3, 924-939, Richardson.

Cinco-Ley, H., Samaniego-V., F., Dominguez-A., N. (1978): Transient Pressure Behavior for a Well with a Finite-Conductivity Vertical Fracture. SPE Journal, 18, 4, 253-264, Richardson.

Clonts, M. D. & Ramey, Jr., H. J. (1986): Pressure Transient Analysis for Wells with Horizontal Drainholes. California Regional Meeting of SPE, 2-4.4.1986., 215-225, Oakland.

Čikeš, M. (2015): Proizvodno inženjerstvo nafte i plina. RGN fakultet, 524 str., Zagreb.

Daneshy, A. (2010): Hydraulic Fracturing to Improve Production. The Way AHead, SPE, 6, 3, 14-17.

DDA book (2017): https://www.kappaeng.com/downloads/ddabook, Kappa Engineering, 757 str.

Denney, D. (2009): Multiple Transverse Fracturing in Open Hole Enables Development of a Low-Permeability Reservoir. Journal of Petroleum Technology, 61, 10, 47-48, Richardson.

Denney, D. (2014): Pressure-Transient Testing of Low-Permeability Multiple-Fracture Horizontal Wells. Journal of Petroelum Technology, 66, 2, 112-116, Richardson.

Dong, Z., Holditch, S. A., McVay, D. A. (2013): Resource Evaluation for Shale Gas Reservoirs. SPE Economics and Management, 5, 1, 5-16, Richardson.

Dong, Z., Holditch, S. A., McVay, D. A., Ayers, W. B. (2011): Global Unconventional Gas Resources Assessment. Paper SPE 148365 presented at the Canadian Unconventional Resources Conference, 15-17.11.2011., 1-16, Calgary.

Economides, M. J. (1984): Well Test Analysis for Tight Reservoirs. Dowell Schlumberger, 1st edition, Paris.

Economides, M. J., Nolte, G. N. (2000): Reservoir Stimulation. John Wiley & Sons, 3rd edition, 20 Chapters.

EIA/ARI (2013): World Shale Gas Resources Assesment. https://www.adv-res.com/pdf/A_EIA_ARI_2013%20World%20Shale%20Gas%20and%20Shale%20Oil%20Resource%20Assessment.pdf .

Garcia, J. P., Pooladi-Darvish, M., Brunner, M., Mattar, L. (2006): Well Testing of Tight Gas Reservoirs. Paper SPE 100576 presented at the SPE Gas Technology Symposium, 15-17.5.2006., 1-13, Calgary.

Gill, J. A., Ozkan, E., Raghavan, R. (2003): Fractured-Well-Test Design and Analysis in the Presence of Non-Darcy Flow. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 6, 3, 185-196, Richardson.

Gringarten, A. C., Ramey, H. J. Jr., Raghavan, R. (1975): Applied Pressure Analysis for Fractured Wells. Journal of Petroleum Technology, 27, 7, 887-892, Richardson.

Gringarten, A. C. (2008): From Sraight Lines to Deconvolution: The Evolution of the State of the Art in Well Test Analysis. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 11, 1, 41-62, Richardson.

Gringarten, A. C. (2012): Well Test Analysis in Practice. The Way AHead, SPE, 8, 2, 10-15.

Hategan, F., Hawkes, R. V. (2007): The Importance of Initial Reservoir Pressure for Tight Gas Completions and Long-Term Production Forecasting. Journal of Canadian Petroleum Technology, 46, 10, 10-14, Calgary.

Hegre, T. M., Larsen, L. (1994): Productivity of Multifractured Horizontal Wells. Paper SPE 28845 presented at the European Petroleum Conference, 25-27.10.1994., 1-12, London.

Holditch, S. A. (2006): Tight Gas Sands. Paper SPE 103 356, Journal of Petroleum Technology, 58, 6, 86-93, Richardson.

Horner, D. R. (1951): Pressure Build-Up in Wells. Third World Petroleum Congress, Sec. II. 503-523., Hag.

Houze, O., Viturat, D., Fjaere, O. S. (2012): Dynamic Data Analysis. KAPPA, http://www.pe.tamu.edu/blasingame/data/z_zCourse_Archive/P648_15A/P648_15A_zReference/PTA_Kappa_DFA_Book_[Houze_2013].pdf , 557 str.

Igbokoyi, A. O. & Tiab, D. (2010): New Method of Well Test Analysis in Naturally Fractured Reservoirs Based on Eliptical Flow. Journal of Canadian Petroleum Technology, 49, 6, 53-67, Calgary.

Ishkin, D. Z., Nuriev, I., Davletbaev, A. Y., Islamov, R. R., Asalkhuzina, G. F. (2016): Decline-Analysis/Short Build-up Welltest Analysis of Low Permeability Gas Reservoirs. Paper SPE 181974 presented at the SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition, 24-26.10.2016., 1-14, Moskva.

Jahanbani, A. & Aguilera, R. (2009): Well Testing in Tight Gas Reservoirs. Journal of Canadian Petroleum Technology, 48, 10, 64-70, Calgary.

Jordan, C. L., Mattar, L. (2002): Comparison of Pressure Transient Behaviour of Composite and Two-Layered Reservoirs. Journal of Canadian Petroleum Technology, 41, 2, 47-54, Calgary.

Kam, P., Nadeem, M., Novlesky, A., Omatsone, E. N. (2015): Reservoir Characterization and History Matching of the Horn River Shale: An Integrated Geoscience and Reservoir-Simulation Approach. Journal of Canadian Petroleum Technology, 54, 6, 475-488, Calgary.

Kanfar, M. S., Clarkson, R. (2018): Rate Dependence of Bilinear Flow in Unconventional Gas Reservoirs. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 21, 1, 17-30, Richardson.

Kim, T. H., Lee, K. S. (2015): Pressure-Transient Characteristics of Hydraulically Fractured Horizintal Wells in Shale-Gas Reservoirs With Natural and Rejuvenated-Fracture Networks. Journal of Canadian Petroleum Technology, 54, 4, 245-258, Calgary.

Karasalihović Sedlar, D., Hrnčević, L., Krištafor, Z. (2014): Razvoj projekata nekonvencionalnih ležišta plina u Hrvatskoj. U: Šunić, M. (ur.): 29. Međunarodni znanstveno stručni susret stručnjaka za plin, 7-9.5.2014, Zbornik radova, 88-89, Zagreb.

Koščak Kolin, S., Čikeš, M. and Babić, V. (2013): Analiza testa porasta tlaka horizontalne bušotine. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 26, 1-27, Zagreb.

Koščak Kolin, S., Kurevija, T., Grebenar, D. (2018): Pressure Build-up Test Analysis of the Reservoir System with the Multiphase Flow. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 31, 3, 87-89, Zagreb.

Kuchuk, F., Biryukov, D. (2014): Pressure-Transient Behaviour of Continuously and Discretely Fractured Reservoirs, SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 17, 1, 82-97, Richardson.

Kuchuk, F., Biryukov, D. (2015): Pressure-Transient Tests and Flow Regimes in Fractured Reservoirs. SPE Reservoirs Evaluation and Engineering, 18, 2, 187-204, Richardson.

Kuchuk, F., Biryukov, D., Fitzpatrick, T., Morton, K. (2015): Pressure-Transient Behaviour of Horizontal Wells Intersecting Multiple Hydraulic and Natural Fractures in Conventional and Unconventional Unfractured and Naturally Fractured Reservoirs. Paper SPE 175037 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 28-30.9.2015., 1-37, Houston.

KURC (Kappa Unconventional Resources Consortium) (2016): KURC Public Report https://www.kappaeng.com/PDF/KURC%20Public%20Report.pdf, Kappa, 20 str.

Kurevija, T., Strpić, K., Koščak Kolin, S. (2018): Applying Petroleum Build-up Well Test Procedure on Thermal Response Test-Novel Method for Analyzing Temperature Recovery Period. Journal Energies, 11, 366, 1-22, Basel.

Larsen, L., Hegre, T. M. (1991): Pressure-Transient Behavior of Horizontal Wells With Finite-Conductivity Vertical Fractures. Paper SPE 22076 presented at the International Arctic Technology Conference, http://dx.doi.org/10.2118/22076-MS, 29-31.5.1991., 1-18, Anchorage.

Larsen, L., Hegre, T. M. (1994): Pressure Transient Analysis of Multifractured Horizontal Wells. Paper SPE 28389 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, http://dx.doi.org/10.2118/28389-MS, 25-28.9.1994., 1-12, New Orleans.

Lin, J. (2011): The Performance of Fractured Horizontal Well in Tight Gas Reservoir. Dissertation, Texas A & M University, 107 str, Texas.

Lougheed, D., Santo, M., Ewens, S. (2013): Is that Radial Flow? What Can be Learned from Buildup Analysis of Multiply-Fractured Horizontal Wells in Unconventional Reservoirs. Paper SPE 164525 presented at the Unconventional Resources Conference, 10-12.4.2013., 1-27, The Woodlands.

Malvić, T., Majstorović Bušić A. (2012): Unconventional Hydrocarbon Resources of the Bjelovar Subdepression (Pannonian Basin System) in Croatia – an overview. Geologica Carpathica, 63, 6, 481-489, Zagreb.

Malvić, T., Cvetković, M. (2013): Lithostratigraphic units in the Drava Depression (Croatian and Hungarian parts) – a correlation. Nafta, 64, 1, 27-33, Zagreb.

Malvić, T. (2015): Bjelovarska subdepresija kao prostor s konvencionalnim i nekonvencionalnim ležištima ugljikovodika te geotermalnom energijom. Radovi Zavoda za znanstvenoistraživački i umjetnički rad u Bjelovaru, 9, 161-186, Bjelovar.

Matthews, C. S. & Russel, D. G. (1967): Pressure Buildup and Flow Tests in Wells. Monograph Volume 1, Henry L. Doherty Series, Society of Petroleum Engineers of AIME, 167 str, New York.

Meyer, B. R., Bazan, L. W., Jacot, R. H., Lattibeaudiere, M. G. (2010): Optimization of Multiple Transverse Hydraulic Fractures in Horizontal Wellbores. Paper SPE 131732 presented at the SPE Unconventional Gas Conference, 23-25.2.2010., 1-37, Pittsburgh.

Murickan, G., Bahrami, H., Rezaee, R., Saeedi, A., Mitchel, T. (2012): Using Relative Permeability Curves to Evaluate Phase Trapping Damage Caused by Water-Based and Oil-Based Drilling Fluids in Tight-Gas Reservoirs, APPEA Journal, 1-8, Melbourne.

National Energy Board (2011): Ultimate Potential for Unconventional Natural Gas in Northeastern British Columbia's Horn River Basin. Oil and Gas Report-2011, British Columbia Ministry of Energy and Mines, 37 str, Victoria.

OECD/IEA (2011): World Energy Outlook 2011, Special Report. IEA, 131 str, Pariz.

Odeh, A. S. & Babu, D. K. (1990): Transient Flow Behavior of Horizontal Wells: Pressure Drawdown and Buildup Analysis. SPE Formation Evaluation, 5, 1, 7-15, Richardson.

Ostojic, J., Rezaee, R., Bahrami, H. (2012): Production Performance of Hydraulic Fractures in Tight Gas Sands, a Numerical Simulation Approach. Journal of Petroelum Science and Engineering, Elsevier, doi: 10.1016/ j.petrol.2011.11.002, 88-89, 1-7, Calgary.

Prats, M., Hazebroek, P., Strickler, W. R. (1962): Effect of Vertical Fractures on Reservoir Behavior - Compressible Fluid Case. SPE Journal, 2, 2, 87-94, Richardson.

Rahman, N. M. A., Mattar, L., Zaoral, K. (2006): A New Method for Computing Pseudo-Time for Real Gas Flow Using the Material Balance Equation. Journal of Canadian Petroleum Technology, 25, 10, 36-44, Calgary.

Sakhaee-Pour, A., Bryant, S. L. (2012): Gas Permeability of Shale. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 15, 4, 401-409, Richardson.

Saphir (2016): Ecrin Reference Manual (modules: Diamant, Saphir, Topaze, Rubis, Amethyste). KAPPA Engineering.

SGS Canada (2015): QEMSCAN Method Summary. Advanced Reservoir Quality Services, 15 str, Burnaby.

Sierra, L., Mayerhofer, M., Jin, C. J. (2013): Production Forecasting of Hydraulically Fractured Conventional Low-Permeability and Unconventional Reservoirs Linking the More Detailed Fracture and Reservoir Parameters. Paper SPE 163833 presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 4-6.2.2013., 1-21, The Woodlands.

Singh, H. S., Javadpour, F., Ettehadtavakkol, A., Darabi, H. (2014): Nonempirical Apparent Permeability of Shale. SPE Reserovir Evaluation & Engineering, 17, 3, 414-424, Richardson.

Slimani, K., Tiab, D. (2008): Pressure Transient Analysis of Partially Penetrating Wells in a Naturally Fractured Reservoir. Journal of Canadian Petroleum Technology, 47, 5, 63-69, Calgary.

Soliman, M. Y., Hunt, J. L., El Rabaa, A. M. (1990): Fracturing Aspects of Horizontal Wells, Journal of Petroelum Technology, 42, 8, 966-973, Richardson.

Soliman, M. Y. (1998): Stimulation and Reservoir Engineering Aspects of Horizontal Wells. Halliburton, 30 str, Oklahoma.

Soliman, M. Y., Ansah, J., Burris, J: Stephenson, S., Proett, M. (2003): Well Test Analysis in the New Economy. Journal of Canadian Petroleum Technology, 42, 7, 35-43, Calgary.

Spivey, J. P., Lee, J. W. (2013): Applied Well Test Interpretation. SPE, 386 str.

Sun, J., Schechter, D. (2015): Investigating the Effect of Improved Fracture Conductivity on Production Performance of Hydraulically Fractured Wells: Field-Case Studies and Numerical Simulations. Journal of Petroleum Technology, 54, 6, 442-449, Calgary.

Sun, J., Schechter, D. (2018): Pressure-Transient Characteristics of Fractured Horizontal Wells in Unconventional Shale Reservoirs With Construction of Data-Constrained Discrete-Fracture network. SPE Production and Operation, 33, 1, 21-31, Richardson.

Tabatabaie, S. H., Mattar, L., Pooladi-Darvish, M. (2013): Pseudotime Calculation in Low Permeability Gas Reservoirs. Paper SPE 167185 presented at the SPE Unconventional Resoures Conference, 5-7.11.2013., 1-9, Calgary.

Themig, D. (2011): New Technologies Enhance Efficiency of Horizontal, Multistage Fracturing. Journal of Petroleum Technology, 63, 4, 26-28, Richardson.

Umberto, J. & Borges, A. (2009): Well Test Analysis in Tight Gas Reservoirs. Paper SPE 121113 presented at the SPE Europec/EAGE Annual Conference and Exhibition, 8-11.6.2009., 1-20, Amsterdam.

Uzun, I., Kurtoglu, B., Kazemi, H. (2016): Multiphase Rate-Transient Analysis in Unconventional Reservoirs: Theory and Application. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 19, 4, 553-566, Richardson.

van Everdingen, A. F., Hurst, W. (1949): The Application of the Laplace Transformation to Flow Problems in Reservoirs. Transactions of the Society of Petroleum Engineers, 186, 305-324, Richardson.

Virues, C., Wang, A., Pyecroft, J. et al. (2016): Performance of Plugless Toe Stages and Non-Isolated Wellbore in Multi-Stage Hydraulic Fractured 10 Well Half Pad in the Canadian Shale Gas Horn River Basin. Paper SPE 179128 presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 9-11.2.2016., 1-55, The Woodlands.

Volz, R., Pinto, E., Soto, O. (2013): An Approach to Practical Pressure Transient Testing of Multiple Fracture Completed Horizontal Wells in Low Permeability Reservoirs. Paper SPE 163983 presented at the SPE Middle East Unconventional Gas Conference and Exhibition, 28-30.1.2013., 1-11, Muscat.

Wang, C. (2013): Pressure Transient Analysis of Fractured Wells in Shale Reservoirs. Master Thesis, Colorado School of Mines, 116 str, Colorado.

Wheaton, R., (2017): Dependence of Shale Permeability on Pressure, SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 20, 1, 228-232, Richardson.

Yasin, I. B. E. (2012): Pressure Transient Analysis Using Generated Well Test Data from Simulation of Selected Wells in Norne Field. Master Thesis. Norwegian University of Science and Technology, 94 str, Trondheim.

Yuan, D., Sun, H., Li, Y., Zhang, M. (2013): Multi-stage Fractured Tight Gas Horizontal Well Test Data Interpretation Study. Paper IPTC 16909 presented at the International Petroleum Technology Conference, 26-28.3.2013., 1-9, Beijing.

Zeng, F., Zhao, G. (2007): Well Testing Analysis for Variable Permeability Reservoirs, 46, 2, Journal of Canadian Petroleum Technology, 46, 2, 15-21, Calgary.

Zeng, F., Zhao, G. (2008): Semianalytical Model for Reservoirs with Forcheimer's Non-Darcy Flow. SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 11, 4, 280-291, Richardson.

Zeng, F., Zhao, G. (2009): Transient Pressure Behaviour Under Non-Darcy Flow, Formation Damage and Their Combined Effect for Dual Porosity Reservoirs, Journal of Canadian Petroleum Technology, 48, 7, 54-65, Calgary.

9. PRILOZI

Prilog 1: Test porasta tlaka za odabranu VFHB na ležištu Eagle Ford

Δt	Δp	Δm(p)/q	p	p^2
(h)	(bar^2)	10^6 x (psi^2/cp)/ MMscfd	(bar)	(bar^2)
0,0028	25,32	0,39	26,68	712,12
0,00565	38,33	0,58	26,93	725,13
0,00844	54,08	0,82	27,22	740,88
0,0115	71,57	1,08	27,54	758,37
0,0144	84,92	1,28	27,78	771,72
0,0205	118,95	1,79	28,39	805,75
0,0232	130,97	1,97	28,60	817,77
0,026	149,65	2,25	28,92	836,45
0,0282	163,67	2,46	29,16	850,47
0,0297	171,01	2,57	29,29	857,81
0,0319	184,36	2,77	29,52	871,16
0,0347	197,04	2,96	29,73	883,84
0,0388	215,72	3,24	30,04	902,52
0,0439	245,75	3,69	30,54	932,56
0,0467	257,10	3,86	30,72	943,90
0,0497	277,79	4,17	31,06	964,59
0,0513	287,13	4,31	31,21	973,93
0,0534	303,15	4,55	31,46	989,95
0,0574	323,84	4,86	31,79	1010,64
0,0611	342,52	5,14	32,08	1029,33
0,065	361,88	5,43	32,38	1048,68
0,067	377,90	5,67	32,63	1064,70
0,0706	399,25	5,99	32,96	1086,05
0,0751	421,94	6,33	33,30	1108,74
0,0815	441,30	6,62	33,59	1128,10
0,0858	471,33	7,07	34,03	1158,13
0,0913	509,37	7,64	34,59	1196,17
0,0973	538,07	8,07	35,00	1224,87
0,101	553,42	8,30	35,22	1240,22
0,103	582,11	8,73	35,62	1268,91
0,107	599,46	8,99	35,86	1286,27
0,11	616,82	9,25	36,11	1303,62
0,114	639,51	9,59	36,42	1326,31
0,118	654,19	9,81	36,62	1340,99
0,122	680,22	10,20	36,97	1367,02
0,128	713,59	10,70	37,42	1400,39
0,132	740,28	11,10	37,78	1427,08
0,135	753,63	11,30	37,95	1440,43
0,138	780,32	11,70	38,30	1467,12
0,144	800,35	12,00	38,56	1487,15
0,147	820,37	12,30	38,82	1507,17
0,152	840,39	12,60	39,08	1527,19
0,154	853,74	12,80	39,25	1540,54
0,16	880,43	13,20	39,59	1567,23
0,163	900,45	13,50	39,84	1587,25
0,166	907,13	13,60	39,92	1593,93
0,168	933,82	14,00	40,26	1620,62
0,174	953,84	14,30	40,50	1640,64
0,177	960,52	14,40	40,59	1647,32
0,181	967,19	14,50	40,67	1653,99
0,183	973,86	14,60	40,75	1660,66
0,188	1000,56	15,00	41,08	1687,36
0,189	1007,23	15,10	41,16	1694,03
0,192	1013,91	15,20	41,24	1700,71
0,197	1033,93	15,50	41,48	1720,73
0,198	1040,60	15,60	41,56	1727,40
0,201	1060,62	15,90	41,80	1747,42
0,208	1087,32	16,30	42,12	1774,12
0,208	1107,34	16,60	42,36	1794,14
0,216	1134,03	17,00	42,67	1820,83
0,219	1147,38	17,20	42,83	1834,18
0,227	1194,10	17,90	43,37	1880,90
0,232	1200,77	18,00	43,45	1887,57
0,238	1220,79	18,30	43,68	1907,59
0,241	1227,47	18,40	43,75	1914,27
0,245	1274,18	19,10	44,28	1960,98
0,251	1300,88	19,50	44,58	1987,68
0,263	1320,90	19,80	44,81	2007,70
0,271	1347,59	20,20	45,10	2034,40
0,274	1387,64	20,80	45,55	2074,44
0,282	1421,01	21,30	45,91	2107,81
0,288	1447,70	21,70	46,20	2134,50
0,298	1461,05	21,90	46,34	2147,85
0,312	1547,81	23,20	47,27	2234,61
0,319	1561,16	23,40	47,41	2247,96
0,33	1594,52	23,90	47,76	2281,33
0,346	1674,61	25,10	48,59	2361,41
0,357	1714,65	25,70	49,00	2401,45
0,362	1748,02	26,20	49,34	2434,82
0,367	1774,72	26,60	49,61	2461,52
0,377	1801,41	27,00	49,88	2488,21
0,382	1854,80	27,80	50,41	2541,60
0,396	1908,19	28,60	50,94	2594,99
0,407	1948,23	29,20	51,33	2635,04
0,415	1961,58	29,40	51,46	2648,38
0,429	2021,65	30,30	52,04	2708,45

0,441	2055,01	30,80	52,36	2741,82	1,91	5218,38	78,20	76,85	5905,18
0,447	2095,06	31,40	52,74	2781,86	2,01	5331,84	79,90	77,58	6018,64
0,466	2141,77	32,10	53,18	2828,57	2,11	5371,88	80,50	77,84	6058,68
0,472	2175,14	32,60	53,50	2861,94	2,15	5371,88	80,50	77,84	6058,68
0,478	2235,21	33,50	54,06	2922,01	2,24	5492,01	82,30	78,61	6178,81
0,485	2235,21	33,50	54,06	2922,01	2,35	5532,05	82,90	78,86	6218,85
0,498	2288,60	34,30	54,55	2975,40	2,45	5572,09	83,50	79,11	6258,89
0,512	2335,31	35,00	54,97	3022,11	2,54	5652,18	84,70	79,62	6338,98
0,515	2388,70	35,80	55,46	3075,50	2,59	5692,22	85,30	79,87	6379,02
0,519	2408,72	36,10	55,64	3095,53	2,68	5692,22	85,30	79,87	6379,02
0,54	2475,46	37,10	56,23	3162,26	2,81	5819,02	87,20	80,66	6505,82
0,544	2495,48	37,40	56,41	3182,28	2,94	5859,07	87,80	80,91	6545,87
0,563	2548,87	38,20	56,88	3235,68	3,07	5905,78	88,50	81,19	6592,58
0,578	2568,90	38,50	57,06	3255,70	3,15	6032,58	90,40	81,97	6719,39
0,59	2622,29	39,30	57,52	3309,09	3,33	6072,63	91,00	82,22	6759,43
0,611	2742,41	41,10	58,56	3429,21	3,44	6119,34	91,70	82,50	6806,14
0,632	2782,46	41,70	58,90	3469,26	3,61	6299,54	94,40	83,58	6986,34
0,64	2842,52	42,60	59,41	3529,32	3,78	6299,54	94,40	83,58	6986,34
0,658	2902,58	43,50	59,91	3589,39	3,83	6299,54	94,40	83,58	6986,34
0,671	2922,61	43,80	60,08	3609,41	4,05	6346,25	95,10	83,86	7033,05
0,676	2969,32	44,50	60,47	3656,12	4,13	6346,25	95,10	83,86	7033,05
0,699	3036,06	45,50	61,02	3722,86	4,25	6346,25	95,10	83,86	7033,05
0,718	3056,08	45,80	61,18	3742,88	4,39	6439,68	96,50	84,42	7126,49
0,733	3122,82	46,80	61,72	3809,62	4,51	6486,40	97,20	84,69	7173,20
0,753	3169,54	47,50	62,10	3856,34	4,7	6533,12	97,90	84,97	7219,92
0,744	3236,27	48,50	62,63	3923,07	5,06	6579,83	98,60	85,24	7266,63
0,795	3329,71	49,90	63,38	4016,51	5,31	6579,83	98,60	85,24	7266,63
0,806	3383,10	50,70	63,80	4069,90	5,72	6626,55	99,30	85,52	7313,35
0,84	3456,51	51,80	64,37	4143,31	5,92	6673,27	100,00	85,79	7360,07
0,869	3529,92	52,90	64,94	4216,72	6,55	6940,22	104,00	87,33	7627,02
0,905	3583,31	53,70	65,35	4270,11	6,69	6940,22	104,00	87,33	7627,02
0,942	3636,70	54,50	65,75	4323,50	6,97	6940,22	104,00	87,33	7627,02
0,975	3743,48	56,10	66,56	4430,28	7,98	7006,96	105,00	87,71	7693,76
1,01	3823,56	57,30	67,16	4510,37	8,65	7140,43	107,00	88,47	7827,23
1,05	3876,96	58,10	67,56	4563,76	9,08	7140,43	107,00	88,47	7827,23
1,09	4023,78	60,30	68,63	4710,58	9,39	7207,17	108,00	88,85	7893,97
1,12	4137,23	62,00	69,46	4824,03	10	7207,17	108,00	88,85	7893,97
1,21	4264,03	63,90	70,36	4950,84	10,5	7207,17	108,00	88,85	7893,97
1,24	4290,73	64,30	70,55	4977,53	11,2	7340,64	110,00	89,60	8027,45
1,33	4517,64	67,70	72,14	5204,44	12,9	7407,38	111,00	89,97	8094,18
1,37	4517,64	67,70	72,14	5204,44	13,5	7474,12	112,00	90,34	8160,92
1,43	4651,11	69,70	73,06	5337,91	14,3	7540,86	113,00	90,71	8227,66
1,47	4684,48	70,20	73,29	5371,28	16,2	7607,60	114,00	91,07	8294,40
1,52	4717,85	70,70	73,52	5404,65	16,6	7607,60	114,00	91,07	8294,40
1,62	4817,96	72,20	74,19	5504,76	17,8	7741,07	116,00	91,80	8427,87
1,67	4964,78	74,40	75,18	5651,58	18,1	7741,07	116,00	91,80	8427,87
1,72	4998,15	74,90	75,40	5684,95	19,7	7874,55	118,00	92,53	8561,35
1,77	4998,15	74,90	75,40	5684,95	20,3	7874,55	118,00	92,53	8561,35
1,86	5071,56	76,00	75,88	5758,36	22,2	7874,55	118,00	92,53	8561,35

23,1	7874,55	118,00	92,53	8561,35
23,6	7874,55	118,00	92,53	8561,35
25,3	7874,55	118,00	92,53	8561,35
25,8	8008,02	120,00	93,25	8694,82
26,3	8008,02	120,00	93,25	8694,82
26,9	8008,02	120,00	93,25	8694,82
28	8074,76	121,00	93,60	8761,56
30,4	8141,50	122,00	93,96	8828,30
31,2	8141,50	122,00	93,96	8828,30
32,7	8208,23	123,00	94,31	8895,04
34,3	8274,97	124,00	94,67	8961,77
35,5	8341,71	125,00	95,02	9028,51
36,5	8408,45	126,00	95,37	9095,25
38,2	8475,19	127,00	95,72	9161,99
39,8	8475,19	127,00	95,72	9161,99
41,2	8541,92	128,00	96,07	9228,72
42,3	8541,92	128,00	96,07	9228,72
46,5	8608,66	129,00	96,41	9295,46
48,1	8608,66	129,00	96,41	9295,46
50,1	8608,66	129,00	96,41	9295,46
52,2	8608,66	129,00	96,41	9295,46
52,6	8608,66	129,00	96,41	9295,46
55,1	8675,40	130,00	96,76	9362,20
57	8675,40	130,00	96,76	9362,20
60,6	8808,87	132,00	97,45	9495,68
61,9	8808,87	132,00	97,45	9495,68
65,3	8808,87	132,00	97,45	9495,68
68,5	8875,61	133,00	97,79	9562,41
73,3	8942,35	134,00	98,13	9629,15
76,4	9075,83	136,00	98,81	9762,63
80,1	9075,83	136,00	98,81	9762,63
87,5	9209,30	138,00	99,48	9896,10
91,1	9209,30	138,00	99,48	9896,10
93,6	9209,30	138,00	99,48	9896,10
98,8	**9142,56**	**137,00**	99,14	9829,36
109	9075,83	136,00	98,81	9762,63

114	9075,83	136,00	98,81	9762,63
117	9075,83	136,00	98,81	9762,63
124	9409,51	141,00	100,48	10096,32
131	9476,25	142,00	100,81	10163,05
141	9476,25	142,00	100,81	10163,05
146	9409,51	141,00	100,48	10096,32
156	9476,25	142,00	100,81	10163,05
165	9609,73	144,00	101,47	10296,53
178	9676,47	145,00	101,80	10363,27
187	9409,51	141,00	100,48	10096,32
195	9809,94	147,00	102,45	10496,74
204	9676,47	145,00	101,80	10363,27
216	9676,47	145,00	101,80	10363,27
225	9609,73	144,00	101,47	10296,53
231	9676,47	145,00	101,80	10363,27
244	9876,68	148,00	102,78	10563,48
259	9743,20	146,00	102,13	10430,00
285	9743,20	146,00	102,13	10430,00
301	9809,94	147,00	102,45	10496,74
320	9809,94	147,00	102,45	10496,74
328	9809,94	147,00	102,45	10496,74
354	9809,94	147,00	102,45	10496,74
363	9876,68	148,00	102,78	10563,48
397	9876,68	148,00	102,78	10563,48
422	10010,15	150,00	103,43	10696,96
443	10010,15	150,00	103,43	10696,96
464	10076,89	151,00	103,75	10763,69
480	10076,89	151,00	103,75	10763,69
521	10076,89	151,00	103,75	10763,69
546	10143,63	152,00	104,07	10830,43
565	10143,63	152,00	104,07	10830,43
609	10210,37	153,00	104,39	10897,17
638	9943,42	149,00	103,10	10630,22
643	**10010,15**	**150,00**	**103,43**	**10696,96**

PRILOG 2: Konstruktivne veličine modificiranog Bourdet dijagrama

t (s)	t_{D1}	t_{D2}	t_{D3}	t_D	t_D/C_{D1}
1,00E-03	1,04E-11	1,04E-14	1,04E-17	1,04E-17	1,33E-05
3,00E-03	3,13E-11	3,13E-14	3,13E-17	3,13E-17	4,00E-05
5,00E-03	5,21E-11	5,21E-14	5,21E-17	5,21E-17	6,66E-05
7,00E-03	7,29E-11	7,29E-14	7,29E-17	7,29E-17	9,33E-05
1,00E-02	1,04E-10	1,04E-13	1,04E-16	1,04E-16	1,33E-04
3,00E-02	3,13E-10	3,13E-13	3,13E-16	3,13E-16	4,00E-04
5,00E-02	5,21E-10	5,21E-13	5,21E-16	5,21E-16	6,66E-04
7,00E-02	7,29E-10	7,29E-13	7,29E-16	7,29E-16	9,33E-04
1,00E-01	1,04E-09	1,04E-12	1,04E-15	1,04E-15	1,33E-03
3,00E-01	3,13E-09	3,13E-12	3,13E-15	3,13E-15	4,00E-03
5,00E-01	5,21E-09	5,21E-12	5,21E-15	5,21E-15	6,66E-03
7,00E-01	7,29E-09	7,29E-12	7,29E-15	7,29E-15	9,33E-03
1,00E+00	1,04E-08	1,04E-11	1,04E-14	1,04E-14	1,33E-02
3,00E+00	3,13E-08	3,13E-11	3,13E-14	3,13E-14	4,00E-02
5,00E+00	5,21E-08	5,21E-11	5,21E-14	5,21E-14	6,66E-02
7,00E+00	7,29E-08	7,29E-11	7,29E-14	7,29E-14	9,33E-02
1,00E+01	1,04E-07	1,04E-10	1,04E-13	1,04E-13	1,33E-01
3,00E+01	3,13E-07	3,13E-10	3,13E-13	3,13E-13	4,00E-01
5,00E+01	5,21E-07	5,21E-10	5,21E-13	5,21E-13	6,66E-01
7,00E+01	7,29E-07	7,29E-10	7,29E-13	7,29E-13	9,33E-01
1,00E+02	1,04E-06	1,04E-09	1,04E-12	1,04E-12	1,33E+00
3,00E+02	3,13E-06	3,13E-09	3,13E-12	3,13E-12	4,00E+00
5,00E+02	5,21E-06	5,21E-09	5,21E-12	5,21E-12	6,66E+00
7,00E+02	7,29E-06	7,29E-09	7,29E-12	7,29E-12	9,33E+00
1,00E+03	1,04E-05	1,04E-08	1,04E-11	1,04E-11	1,33E+01
3,00E+03	3,13E-05	3,13E-08	3,13E-11	3,13E-11	4,00E+01
5,00E+03	5,21E-05	5,21E-08	5,21E-11	5,21E-11	6,66E+01
7,00E+03	7,29E-05	7,29E-08	7,29E-11	7,29E-11	9,33E+01
1,00E+04	1,04E-04	1,04E-07	1,04E-10	1,04E-10	1,33E+02
3,00E+04	3,13E-04	3,13E-07	3,13E-10	3,13E-10	4,00E+02
5,00E+04	5,21E-04	5,21E-07	5,21E-10	5,21E-10	6,66E+02
7,00E+04	7,29E-04	7,29E-07	7,29E-10	7,29E-10	9,33E+02
1,00E+05	1,04E-03	1,04E-06	1,04E-09	1,04E-09	1,33E+03
3,00E+05	3,13E-03	3,13E-06	3,13E-09	3,13E-09	4,00E+03
5,00E+05	5,21E-03	5,21E-06	5,21E-09	5,21E-09	6,66E+03
7,00E+05	7,29E-03	7,29E-06	7,29E-09	7,29E-09	9,33E+03
1,00E+06	1,04E-02	1,04E-05	1,04E-08	1,04E-08	1,33E+04
3,00E+06	3,13E-02	3,13E-05	3,13E-08	3,13E-08	4,00E+04
5,00E+06	5,21E-02	5,21E-05	5,21E-08	5,21E-08	6,66E+04
7,00E+06	7,29E-02	7,29E-05	7,29E-08	7,29E-08	9,33E+04
1,00E+07	1,04E-01	1,04E-04	1,04E-07	1,04E-07	1,33E+05
3,00E+07	3,13E-01	3,13E-04	3,13E-07	3,13E-07	4,00E+05
5,00E+07	5,21E-01	5,21E-04	5,21E-07	5,21E-07	6,66E+05
7,00E+07	7,29E-01	7,29E-04	7,29E-07	7,29E-07	9,33E+05
1,00E+08	1,04E+00	1,04E-03	1,04E-06	1,04E-06	1,33E+06
3,00E+08	3,13E+00	3,13E-03	3,13E-06	3,13E-06	4,00E+06

5,00E+08	5,21E+00	5,21E-03	5,21E-06	5,21E-06	6,66E+06
7,00E+08	7,29E+00	7,29E-03	7,29E-06	7,29E-06	9,33E+06
1,00E+09	1,04E+01	1,04E-02	1,04E-05	1,04E-05	1,33E+07
3,00E+09	3,13E+01	3,13E-02	3,13E-05	3,13E-05	4,00E+07
5,00E+09	5,21E+01	5,21E-02	5,21E-05	5,21E-05	6,66E+07
7,00E+09	7,29E+01	7,29E-02	7,29E-05	7,29E-05	9,33E+07
1,00E+10	1,04E+02	1,04E-01	1,04E-04	1,04E-04	1,33E+08
1,00E+11	1,04E+03	1,04E+00	1,04E-03	1,04E-03	1,33E+09
1,00E+12	1,04E+04	1,04E+01	1,04E-02	1,04E-02	1,33E+10
1,00E+13	1,04E+05	1,04E+02	1,04E-01	1,04E-01	1,33E+11
1,00E+14	1,04E+06	1,04E+03	1,04E+00	1,04E+00	1,33E+12
1,00E+15	1,04E+07	1,04E+04	1,04E+01	1,04E+01	1,33E+13
1,00E+16	1,04E+08	1,04E+05	1,04E+02	1,04E+02	1,33E+14
1,00E+17	1,04E+09	1,04E+06	1,04E+03	1,04E+03	1,33E+15
1,00E+18	1,04E+10	1,04E+07	1,04E+04	1,04E+04	1,33E+16
1,00E+19	1,04E+11	1,04E+08	1,04E+05	1,04E+05	1,33E+17
1,00E+20	1,04E+12	1,04E+09	1,04E+06	1,04E+06	1,33E+18
1,00E+21	1,04E+13	1,04E+10	1,04E+07	1,04E+07	1,33E+19
1,00E+22	1,04E+14	1,04E+11	1,04E+08	1,04E+08	1,33E+20
1,00E+23	1,04E+15	1,04E+12	1,04E+09	1,04E+09	1,33E+21
1,00E+24	1,04E+16	1,04E+13	1,04E+10	1,04E+10	1,33E+22
1,00E+25	1,04E+17	1,04E+14	1,04E+11	1,04E+11	1,33E+23
1,00E+26	1,04E+18	1,04E+15	1,04E+12	1,04E+12	1,33E+24
1,00E+27	1,04E+19	1,04E+16	1,04E+13	1,04E+13	1,33E+25
1,00E+28	1,04E+20	1,04E+17	1,04E+14	1,04E+14	1,33E+26
1,00E+29	1,04E+21	1,04E+18	1,04E+15	1,04E+15	1,33E+27
				1,04E+16	1,33E+28
				1,04E+17	1,33E+29
				1,04E+18	1,33E+30
				1,04E+19	
				1,04E+20	
				1,04E+21	

t_D/C_{D2}	t_D/C_D	p_D ($C_D = 10^{-9}$)	p_D ($C_D = 10^0$)	p_D ($C_D = 10^9$)	$(t_D/C_D)p_D'$
1,33E-26	1,33E-26	-3,97E+01	-2,94E+01	-1,90E+01	5,00E-04
4,00E-26	4,00E-26	-3,92E+01	-2,88E+01	-1,85E+01	5,00E-04
6,66E-26	6,66E-26	-3,89E+01	-2,86E+01	-1,82E+01	5,00E-04
9,33E-26	9,33E-26	-3,88E+01	-2,84E+01	-1,81E+01	5,00E-04
1,33E-25	1,33E-25	-3,86E+01	-2,82E+01	-1,79E+01	5,00E-04
4,00E-25	4,00E-25	-3,80E+01	-2,77E+01	-1,73E+01	5,00E-04
6,66E-25	6,66E-25	-3,78E+01	-2,74E+01	-1,71E+01	5,00E-04
9,33E-25	9,33E-25	-3,76E+01	-2,73E+01	-1,69E+01	5,00E-04
1,33E-24	1,33E-24	-3,74E+01	-2,71E+01	-1,67E+01	5,00E-04
4,00E-24	4,00E-24	-3,69E+01	-2,65E+01	-1,62E+01	5,00E-04
6,66E-24	6,66E-24	-3,66E+01	-2,63E+01	-1,59E+01	5,00E-04
9,33E-24	9,33E-24	-3,65E+01	-2,61E+01	-1,57E+01	5,00E-04
1,33E-23	1,33E-23	-3,63E+01	-2,59E+01	-1,56E+01	5,00E-04
4,00E-23	4,00E-23	-3,57E+01	-2,54E+01	-1,50E+01	5,00E-04

6,66E-23	6,66E-23	-3,55E+01	-2,51E+01	-1,48E+01	5,00E-04
9,33E-23	9,33E-23	-3,53E+01	-2,50E+01	-1,46E+01	5,00E-04
1,33E-22	1,33E-22	-3,51E+01	-2,48E+01	-1,44E+01	5,00E-04
4,00E-22	4,00E-22	-3,46E+01	-2,42E+01	-1,39E+01	5,00E-04
6,66E-22	6,66E-22	-3,43E+01	-2,40E+01	-1,36E+01	5,00E-04
9,33E-22	9,33E-22	-3,42E+01	-2,38E+01	-1,34E+01	5,00E-04
1,33E-21	1,33E-21	-3,40E+01	-2,36E+01	-1,33E+01	5,00E-04
4,00E-21	4,00E-21	-3,34E+01	-2,31E+01	-1,27E+01	5,00E-04
6,66E-21	6,66E-21	-3,32E+01	-2,28E+01	-1,25E+01	5,00E-04
9,33E-21	9,33E-21	-3,30E+01	-2,27E+01	-1,23E+01	5,00E-04
1,33E-20	1,33E-20	-3,28E+01	-2,25E+01	-1,21E+01	5,00E-04
4,00E-20	4,00E-20	-3,23E+01	-2,19E+01	-1,16E+01	5,00E-04
6,66E-20	6,66E-20	-3,20E+01	-2,17E+01	-1,13E+01	5,00E-04
9,33E-20	9,33E-20	-3,19E+01	-2,15E+01	-1,11E+01	5,00E-04
1,33E-19	1,33E-19	-3,17E+01	-2,13E+01	-1,10E+01	5,00E-04
4,00E-19	4,00E-19	-3,11E+01	-2,08E+01	-1,04E+01	5,00E-04
6,66E-19	6,66E-19	-3,09E+01	-2,05E+01	-1,02E+01	5,00E-04
9,33E-19	9,33E-19	-3,07E+01	-2,04E+01	-9,99E+00	5,00E-04
1,33E-18	1,33E-18	-3,05E+01	-2,02E+01	-9,81E+00	5,00E-04
4,00E-18	4,00E-18	-3,00E+01	-1,96E+01	-9,26E+00	5,00E-04
6,66E-18	6,66E-18	-2,97E+01	-1,94E+01	-9,01E+00	5,00E-04
9,33E-18	9,33E-18	-2,96E+01	-1,92E+01	-8,84E+00	5,00E-04
1,33E-17	1,33E-17	-2,94E+01	-1,90E+01	-8,66E+00	5,00E-04
4,00E-17	4,00E-17	-2,88E+01	-1,85E+01	-8,11E+00	5,00E-04
6,66E-17	6,66E-17	-2,86E+01	-1,82E+01	-7,86E+00	5,00E-04
9,33E-17	9,33E-17	-2,84E+01	-1,81E+01	-7,69E+00	5,00E-04
1,33E-16	1,33E-16	-2,82E+01	-1,79E+01	-7,51E+00	5,00E-04
4,00E-16	4,00E-16	-2,77E+01	-1,73E+01	-6,96E+00	5,00E-04
6,66E-16	6,66E-16	-2,74E+01	-1,71E+01	-6,71E+00	5,00E-04
9,33E-16	9,33E-16	-2,73E+01	-1,69E+01	-6,54E+00	5,00E-04
1,33E-15	1,33E-15	-2,71E+01	-1,67E+01	-6,36E+00	5,00E-04
4,00E-15	4,00E-15	-2,65E+01	-1,62E+01	-5,81E+00	5,00E-04
6,66E-15	6,66E-15	-2,63E+01	-1,59E+01	-5,55E+00	5,00E-04
9,33E-15	9,33E-15	-2,61E+01	-1,57E+01	-5,39E+00	5,00E-04
1,33E-14	1,33E-14	-2,59E+01	-1,56E+01	-5,21E+00	5,00E-04
4,00E-14	4,00E-14	-2,54E+01	-1,50E+01	-4,66E+00	5,00E-04
6,66E-14	6,66E-14	-2,51E+01	-1,48E+01	-4,40E+00	5,00E-04
9,33E-14	9,33E-14	-2,50E+01	-1,46E+01	-4,24E+00	5,00E-04
1,33E-13	1,33E-13	-2,48E+01	-1,44E+01	-4,06E+00	5,00E-04
1,33E-12	1,33E-12	-2,36E+01	-1,33E+01	-2,91E+00	5,00E-04
1,33E-11	1,33E-11	-2,25E+01	-1,21E+01	-1,75E+00	5,00E-04
1,33E-10	1,33E-10	-2,13E+01	-1,10E+01	-6,03E-01	5,00E-04
1,33E-09	1,33E-09	-2,02E+01	-9,81E+00	5,48E-01	5,00E-04
1,33E-08	1,33E-08	-1,90E+01	-8,66E+00	1,70E+00	5,00E-04
1,33E-07	1,33E-07	-1,79E+01	-7,51E+00	2,85E+00	5,00E-04
1,33E-06	1,33E-06	-1,67E+01	-6,36E+00	4,00E+00	5,00E-04
1,33E-05	1,33E-05	-1,56E+01	-5,21E+00	5,15E+00	5,00E-04
1,33E-04	1,33E-04	-1,44E+01	-4,06E+00	6,30E+00	5,00E-04
1,33E-03	1,33E-03	-1,33E+01	-2,91E+00	7,46E+00	5,00E-04

1,33E-02	1,33E-02	-1,21E+01	-1,75E+00	8,61E+00	5,00E-04
1,33E-01	1,33E-01	-1,10E+01	-6,03E-01	9,76E+00	5,00E-04
1,33E+00	1,33E+00	-9,81E+00	5,48E-01	1,09E+01	5,00E-04
1,33E+01	1,33E+01	-8,66E+00	1,70E+00	1,21E+01	5,00E-04
1,33E+02	1,33E+02	-7,51E+00	2,85E+00	1,32E+01	5,00E-04
1,33E+03	1,33E+03	-6,36E+00	4,00E+00	1,44E+01	5,00E-04
1,33E+04	1,33E+04	-5,21E+00	5,15E+00	1,55E+01	5,00E-04
1,33E+05	1,33E+05	-4,06E+00	6,30E+00	1,67E+01	5,00E-04
1,33E+06	1,33E+06	-2,91E+00	7,46E+00	1,78E+01	5,00E-04
	1,33E+07	-1,75E+00	8,61E+00	1,90E+01	5,00E-04
	1,33E+08	-6,03E-01	9,76E+00	2,01E+01	5,00E-04
	1,33E+09	5,48E-01	1,09E+01	2,13E+01	5,00E-04
	1,33E+10	1,70E+00	1,21E+01	2,24E+01	5,00E-04
	1,33E+11	2,85E+00	1,32E+01	2,36E+01	5,00E-04
	1,33E+12	4,00E+00	1,44E+01	2,47E+01	5,00E-04
	1,33E+13	5,15E+00	1,55E+01	2,59E+01	5,00E-04
	1,33E+14	6,30E+00	1,67E+01	2,70E+01	5,00E-04
	1,33E+15	7,46E+00	1,78E+01	2,82E+01	5,00E-04
	1,33E+16	8,61E+00	1,90E+01	2,93E+01	5,00E-04
	1,33E+17	9,76E+00	2,01E+01	3,05E+01	5,00E-04
	1,33E+18	1,09E+01	2,13E+01	3,16E+01	5,00E-04
	1,33E+19	1,21E+01	2,24E+01	3,28E+01	5,00E-04
	1,33E+20	1,32E+01	2,36E+01	3,39E+01	5,00E-04
	1,33E+21	1,44E+01	2,47E+01	3,51E+01	5,00E-04
	1,33E+22	1,55E+01	2,59E+01	3,62E+01	5,00E-04
	1,33E+23	1,67E+01	2,70E+01	3,74E+01	5,00E-04
	1,33E+24	1,78E+01	2,82E+01	3,85E+01	5,00E-04
	1,33E+25	1,90E+01	2,93E+01	3,97E+01	5,00E-04
	1,33E+26	2,01E+01	3,05E+01	4,08E+01	5,00E-04
	1,33E+27	2,13E+01	3,16E+01	4,20E+01	5,00E-04
	1,33E+28	2,24E+01	3,28E+01	4,31E+01	5,00E-04
	1,33E+29	2,36E+01	3,39E+01	4,43E+01	5,00E-04
	1,33E+30	2,47E+01	3,51E+01	4,54E+01	5,00E-04

Prilog 3: Test porasta tlaka za FB na ležištu Perth Basin

Δt (h)	Δp (bar^2)	m(p) (psi^2/cp)	p (bar)	p^2 (bar^2)
0,1258	0,00	11230764,80	18,05	325,93
0,2588	319,49	22239859,08	25,41	645,42
0,3835	536,73	29725255,99	29,37	862,65
0,4051	600,10	31908873,18	30,43	926,02
0,4932	748,11	37008958,22	32,77	1074,03
0,5443	927,73	43198603,44	35,41	1253,66
0,6480	985,71	45196321,93	36,22	1311,64
0,6414	1146,93	50751584,28	38,38	1472,85
0,7156	1382,23	58859767,86	41,33	1708,16
0,8250	1667,98	68705992,43	44,65	1993,91
1,0262	1870,56	75686587,72	46,87	2196,49
1,1076	1942,57	78167843,51	47,63	2268,50
1,2492	2221,63	87783788,13	50,47	2547,56
1,4400	2535,07	98584154,94	53,49	2861,00
1,6595	2785,25	107204707,88	55,78	3111,17
1,7918	3101,00	118085122,17	58,54	3426,93
1,9132	3282,38	124334805,12	60,07	3608,30
2,1809	3547,65	133475552,51	62,24	3873,57
2,3802	3832,29	143283938,61	64,48	4158,22
2,5416	4109,13	152823263,53	66,60	4435,06
2,8348	4404,55	163002645,97	68,78	4730,47
3,3389	4785,25	176120858,89	71,49	5111,18
3,6438	5090,62	186643192,47	73,60	5416,54
3,7659	5451,10	199064672,61	76,01	5777,03
4,1997	5640,63	205595364,33	77,24	5966,55
5,0552	6079,51	220718562,72	80,03	6405,44
5,3984	6594,54	238465327,59	83,19	6920,47
5,8911	6960,92	251089984,51	85,36	7286,84
6,3586	7199,80	259321541,72	86,75	7525,73
6,7891	7496,69	269551470,60	88,45	7822,61
7,1706	7910,64	283815385,02	90,76	8236,56
7,9966	8180,85	293126483,58	92,23	8506,78
8,6317	8573,64	306661098,63	94,34	8899,56
9,2152	8747,69	312658443,67	95,26	9073,61
10,5041	9290,08	331348300,13	98,06	9616,01
11,5865	9478,37	337836166,68	99,02	9804,29
12,6440	9997,42	355721641,88	101,60	10323,34
13,4999	10404,66	369754440,98	103,59	10730,59
15,0549	10756,70	381884932,22	105,27	11082,62
16,7896	11194,25	396961930,78	107,33	11520,17
18,7258	11882,70	420684810,77	110,49	12208,63
20,8821	12202,28	431696714,93	111,93	12528,20
23,8001	12613,49	445866128,14	113,75	12939,41
27,1283	13298,93	469485143,57	116,73	13624,86

35,2385	14114,71	497595123,90	120,17	14440,63
41,0516	14978,16	527348012,90	123,71	15304,09
46,7908	15685,41	551718408,77	126,54	16011,34
49,9554	16104,02	566143025,59	128,18	16429,95
57,5556	16426,24	577245798,85	129,43	16752,16
65,6042	17313,65	607824433,48	132,81	17639,58
73,9595	17775,53	623739679,13	134,54	18101,45
82,4786	18369,38	644202634,75	136,73	18695,31
94,0038	18983,01	665347047,04	138,96	19308,93
105,9987	20402,39	714256064,64	143,97	20728,32
124,8252	21221,57	742483496,47	146,79	21547,50
150,2129	21503,76	752207116,13	147,75	21829,69
173,0875	22512,75	786974943,65	151,12	22838,68
195,1437	23414,62	818051316,33	154,08	23740,54
219,9771	23570,02	823406195,14	154,58	23895,95

PRILOG 4: Test porasta tlaka za FB na ležištu Montney

Δt	Δp	Δm(p)	p	p^2
(h)	(bar^2)	10^6 x ($kPa^2/Pa \cdot s$)	(bar)	(bar^2)
0,0173	268,02	0,1587	52,61	2768,02
0,0257	440,06	0,2605	54,22	2940,06
0,0341	607,79	0,3598	55,75	3107,79
0,0424	774,36	0,4584	57,22	3274,36
0,0526	964,12	0,5708	58,86	3464,12
0,0595	1133,02	0,6707	60,27	3633,02
0,0673	1346,93	0,7974	62,02	3846,93
0,0790	1619,89	0,9590	64,19	4119,89
0,0945	1993,61	1,1802	67,03	4493,61
0,1120	2481,92	1,4693	70,58	4981,92
0,1266	2817,70	1,6681	72,92	5317,70
0,1445	3126,14	1,8507	75,01	5626,14
0,1729	3936,99	2,3307	80,23	6436,99
0,1936	4573,65	2,7076	84,11	7073,65
0,2209	5500,19	3,2561	89,44	8000,19
0,2545	6244,54	3,6967	93,51	8744,54
0,2850	7423,34	4,3946	99,62	9923,34
0,3410	8142,45	4,8203	103,16	10642,45
0,3713	9458,64	5,5995	109,36	11958,64
0,4400	11775,41	6,9710	119,48	14275,41
0,4835	13063,46	7,7335	124,75	15563,46
0,5415	14660,76	8,6791	131,00	17160,76
0,6602	16839,48	9,9689	139,07	19339,48
0,7464	19339,05	11,4486	147,78	21839,05
0,8680	21956,66	12,9983	156,39	24456,66
1,0191	25509,72	15,1017	167,36	28009,72
1,1851	27979,30	16,5636	174,58	30479,30
1,3398	30334,96	17,9582	181,20	32834,96
1,5436	35650,56	21,1050	195,32	38150,56
1,7616	36913,15	21,8524	198,53	39413,15
2,0681	39565,84	23,4228	205,10	42065,84
2,4742	43398,64	25,6918	214,24	45898,64
2,9048	48709,70	28,8360	226,30	51209,70
3,5082	52213,09	30,9100	233,91	54713,09
4,0416	54689,30	32,3759	239,14	57189,30
4,6125	58616,13	34,7005	247,22	61116,13
5,5706	61401,80	36,3496	252,79	63901,80
6,5399	64316,21	38,0750	258,49	66816,21
7,7508	66599,04	39,4264	262,87	69099,04
8,8455	73043,69	43,2416	274,85	75543,69
10,5825	69781,20	41,3102	268,85	72281,20
12,3073	75660,57	44,7908	279,57	78160,57
15,1470	81105,43	48,0141	289,15	83605,43
17,2864	80198,21	47,4770	287,57	82698,21

19,9150	80220,92	47,4905	287,61	82720,92
24,0518	82120,50	48,6150	290,90	84620,50
29,0479	83102,77	49,1965	292,58	85602,77
34,7523	86054,03	50,9437	297,58	88554,03
40,0368	86078,40	50,9581	297,62	88578,40
47,0036	87103,08	51,5647	299,34	89603,08
57,3056	91244,28	54,0163	306,18	93744,28
66,6454	89194,24	52,8027	302,81	91694,24
77,5076	90254,31	53,4302	304,56	92754,31
93,6077	91333,88	54,0693	306,32	93833,88
110,9384	92422,87	54,7140	308,10	94922,87
132,7244	91397,68	54,1071	306,43	93897,68

PRILOG 5: Test porasta tlaka za VFHB na ležištu Changqing

Δt	Δp	Δm(p)	p	p^2
(h)	(bar^2)	10^{-3} x (MPa^2/Pa·s)	(bar)	(bar^2)
0,0057	81,29	39,91	259,85	67520,18
0,0110	163,60	80,32	260,00	67602,50
0,0175	239,12	117,39	260,15	67678,01
0,0225	310,05	152,21	260,29	67748,94
0,0289	402,02	197,36	260,46	67840,91
0,0339	462,35	226,98	260,58	67901,25
0,0399	531,75	261,04	260,71	67970,64
0,0444	575,97	282,75	260,80	68014,86
0,0494	649,34	318,77	260,94	68088,24
0,0541	675,76	331,74	260,99	68114,66
0,0571	717,52	352,24	261,07	68156,41
0,0602	717,45	352,21	261,07	68156,35
0,0635	761,78	373,97	261,15	68200,68
0,0658	777,14	381,51	261,18	68216,04
0,0694	777,07	381,48	261,18	68215,97
0,0707	792,76	389,18	261,21	68231,66
0,0759	808,69	397,00	261,24	68247,59
0,0787	824,99	405,00	261,27	68263,89
0,0801	841,65	413,18	261,31	68280,54
0,0845	858,59	421,50	261,34	68297,48
0,0924	893,52	438,65	261,40	68332,42
0,0975	893,45	438,61	261,40	68332,34
0,1085	929,78	456,44	261,47	68368,67
0,1187	948,44	465,61	261,51	68387,33
0,1252	967,53	474,98	261,55	68406,42
0,1393	967,36	474,90	261,55	68406,26
0,1444	986,86	484,47	261,58	68425,76
0,1551	1006,70	494,21	261,62	68445,59
0,1666	1026,93	504,14	261,66	68465,83
0,1821	1047,54	514,26	261,70	68486,44
0,2063	1068,51	524,55	261,74	68507,40
0,2422	1089,83	535,02	261,78	68528,72
0,2696	1134,14	556,77	261,86	68573,04
0,3055	1180,22	579,39	261,95	68619,12
0,3400	1180,02	579,30	261,95	68618,92
0,3992	1227,90	602,80	262,04	68666,80
0,4605	1277,76	627,27	262,14	68716,65
0,5034	1277,58	627,19	262,14	68716,47
0,5702	1277,32	627,06	262,14	68716,22
0,6460	1302,89	639,61	262,19	68741,78
0,7585	1328,88	652,37	262,24	68767,78
0,8906	1382,80	678,84	262,34	68821,70
1,0090	1410,47	692,43	262,39	68849,37
1,2277	1467,62	720,48	262,50	68906,52
1,3662	1467,37	720,36	262,50	68906,27

1,7534	1496,44	734,63	262,56	68935,34
1,9170	1526,47	749,37	262,61	68965,37
2,1716	1526,17	749,23	262,61	68965,07
2,3746	1588,27	779,71	262,73	69027,17
2,5961	1620,15	795,36	262,79	69059,05
2,6906	1652,81	811,39	262,85	69091,70
2,9950	1720,01	844,38	262,98	69158,91
3,2162	1719,82	844,29	262,98	69158,71
3,5804	1825,93	896,38	263,18	69264,82
4,2042	1900,01	932,75	263,32	69338,90
4,6791	1938,09	951,44	263,40	69376,98
5,0246	1937,87	951,33	263,39	69376,76
5,9025	2141,27	1051,19	263,78	69580,16
6,6872	2184,12	1072,22	263,86	69623,02
7,5763	2227,83	1093,68	263,94	69666,73
8,4333	2318,42	1138,15	264,12	69757,31
8,8975	2365,08	1161,06	264,20	69803,98
9,9038	2461,25	1208,27	264,39	69900,15
11,0210	2460,83	1208,07	264,39	69899,73
12,9409	2560,67	1257,08	264,57	69999,57
14,6615	2611,92	1282,24	264,67	70050,82
15,1975	2718,43	1334,53	264,87	70157,33
18,1658	2828,65	1388,63	265,08	70267,54
20,2177	2885,34	1416,46	265,19	70324,23
23,3240	3063,18	1503,77	265,52	70502,08
25,9622	3187,73	1564,92	265,76	70626,63
31,0329	3316,97	1628,36	266,00	70755,87
35,1589	3383,36	1660,95	266,12	70822,25
39,8447	3592,00	1763,38	266,52	71030,90
47,6337	3813,19	1871,96	266,93	71252,08
53,0140	3889,61	1909,48	267,07	71328,50
61,1420	3967,34	1947,64	267,22	71406,23
69,2907	4211,99	2067,74	267,68	71650,89
81,3848	4561,87	2239,50	268,33	72000,77
92,2053	4653,17	2284,32	268,50	72092,06
104,4793	4842,23	2377,14	268,85	72281,13
118,4037	5140,84	2523,73	269,41	72579,74
131,7592	5139,97	2523,30	269,40	72578,86
146,6418	5242,98	2573,87	269,60	72681,88
166,1855	5566,30	2732,60	270,19	73005,20
184,9827	5792,63	2843,71	270,61	73231,53
205,9061	6028,17	2959,34	271,05	73467,07
221,1435	6149,33	3018,82	271,27	73588,23
233,3482	6399,91	3141,83	271,73	73838,81
264,4104	6659,95	3269,49	272,21	74098,85
294,3178	6930,75	3402,43	272,71	74369,65
333,4490	7069,45	3470,52	272,96	74508,35
364,5611	7211,34	3540,18	273,22	74650,24
398,5762	7356,07	3611,23	273,49	74794,97

451,6963	7809,70	3833,92	274,31	75248,60
502,7168	7966,22	3910,76	274,60	75405,12
559,6579	8457,72	4152,05	275,49	75896,61
622,8731	8627,22	4235,26	275,80	76066,12
731,2811	8799,38	4319,77	276,11	76238,28
785,5078	9157,69	4495,67	276,76	76596,58
858,7989	9341,49	4585,90	277,09	76780,38
955,9376	9721,32	4772,37	277,78	77160,22
1122,3139	9915,31	4867,60	278,13	77354,21

10. ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODACI

Ime i prezime:	Mr. sc. Sonja Koščak Kolin, dipl. ing.
Datum i mjesto rođenja:	27. listopada 1971, Zagreb
Adresa:	Medveščak 11, 10 000 Zagreb
Telefon:	00 385 1 5535 855
E-mail:	sonja.koscak-kolin@rgn.hr

OBRAZOVANJE

2013-2018.	Sveučilište u Zagrebu, RGN fakultet Poslijediplomski doktorski studij Naftnog rudarstva
1996-2000.	Sveučilište u Zagrebu, RGN fakultet Poslijediplomski znanstveni studij Naftnog rudarstva Akademski stupanj: Magistar tehničkih znanosti (mr. sc.) polje: Rudarstvo, nafta i geološko inženjerstvo
1990-1996.	Sveučilište u Zagrebu, RGN fakultet Diplomski studij, smjer: Naftno rudarstvo Zvanje: Dipl. ing. naftnog rudarstva (dipl. ing. = mag. ing.)
1985-1989.	Centar za odgoj i usmjereno obrazovanje, Kutina MIOC = Matematičko-informatički smjer

PROFESIONALNO ISKUSTVO

2007- Sveučilište u Zagrebu, RGN fakultet,
Zavod za naftno inženjerstvo
Asistent (Ugovor o radu na neodređeno vrijeme):

- nastava iz 5 kolegija na studijima Naftnog rudarstva:

- Proizvodnja nafte i plina I i II (PDS i DS);
- Analiza hidrodinamičkih mjerenja (DS);
- Obrada stijena u bušotini (DS);
- Ispitivanja u bušotini (izborni, PDS).

- istraživač na projektima Sveučilišne potpore iz područja nekonvencionalnih ležišta nafte i plina (2013/14, 2014/15, 2015/16, 2016/2017);

- istraživač na znanstvenom projektu Programa Održivo gospodarenje energetskim mineralnim sirovinama u RH, unutar Projekta na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije: Sniženje specifične potrošnje energije u industrijskim procesima;

2006-2007. Volonter u nastavi iz kolegija Proizvodnja nafte i plina;

2001-2005. Sveučilište u Zagrebu, RGN fakultet,

Znanstveni novak u Zavodu za naftno inženjerstvo:

- istraživački rad na znanstvenom projektu Optimizacija termodinamičkih procesa u uporabi geotermalne energije;
- nastava iz predmeta: Termodinamika, Opće strojarstvo, Elementi strojeva i mehanička tehnologija, Iskorištavanje geotermijskih ležišta;
- objavljivanje radova i aktivno sudjelovanje na međunarodnim i domaćim znanstvenim skupovima;
- suradnja s inozemnim znanstvenim institucijama na području Energetike (CIRPS, UniRoma1), itd.

1997-2001. Sveučilište u Zagrebu, RGN fakultet,

Znanstveni novak u Zavodu za naftno inženjerstvo:

- istraživački rad na znanstvenom projektu Razvoj ekološkog plosnatog motora Stirlingovog tipa i na Nacionalnom energetskom programu: Korištenje geotermalne energije u Hrvatskoj (Geoen);
- nastava, objavljivanje i prezentiranje radova, suradnje s inozemstvom, itd.

ZBIRNI PREGLED OBJAVLJENIH RADOVA

48 = broj radova prema bazi http://bib.irb.hr, od čega:

A) Znanstveni radovi u časopisima citiranim u bazi CC (1);

B) Znanstveni radovi citirani u bazi WOS (9);

C) Ostali radovi (38):

- Plenarna izlaganja (2);
- Znanstveni radovi u zbornicima skupova s

međunarodnom recenzijom (24);
- Drugi radovi u zbornicima skupova s recenzijom (4);
- Sažeci u zbornicima skupova (3);
- Neobjavljena sudjelovanja na skupovima (4);
- Magistarski radovi (1).

CITIRANOST **21 = ukupan broj citiranih radova, od čega:**

- 10 = broj citiranih radova (od 2007. do 2018. godine):
  - 1 rad citiran je u bazi Current Contents;
  - prethodni rad i još 2 rada citirana su u bazi WOS CC;
  - 3 prethodna i još 7 radova citirano je u bazi WOS.
- 11 = broj citiranih radova (do 2007. godine):
  - 1 rad citiran u časopisu indeksiranom u bazi SpringerLink;
  - 10 radova citirano u ostalim časopisima.

RECENZENT

1 rad za Časopis Applied Thermal Engineering, Elsevier;
10 radova za Međunarodne konferencije;

USAVRŠAVANJE

2000- povremeno	Sveučilište u Rimu 'La Sapienza' (UniRoma 1), Italija.

NAGRADE

2001.	American Association of Petroleum Geologists (AAPG), Nagrada Grant-in-aid u području geotermalne energije;
2000.	Društvo sveučilišnih nastavnika i drugih znanstvenika, Nagrada mladim znanstvenicima i umjetnicima;
1997.	Hrvatski državni sabor, Državna nagrada za znanost;
1996.	Hrvatsko energetsko društvo (HED), Nagrada za izvrstan uspjeh na studiju;
1995.	Sveučilište u Zagrebu, Godišnja sveučilišna stipendija;
1994, 1993, 1992.	Sveučilište u Zagrebu, Tri Rektorove nagrade.

VJEŠTINE

Rad na računalu

Aktivna uporaba softvera **Prosper** (dio paketa IPM):

- modeliranje i projektiranje proizvodnih sustava;

Aktivna uporaba softvera **Saphir** (dio paketa Kappa):

- analiza testova porasta tlaka u bušotinama.

STRANI JEZICI

Engleski: aktivno u govoru i pismu (stupanj B2);

Talijanski: aktivno u govoru i pismu (stupanj B2);

Njemački: pasivno u govoru i pismu (stupanj B1).

ČLANSTVA U PROFESIONALNIM DRUŠTVIMA

Society of Petroleum Engineers (1991-1996, 2006-);

International Geothermal Association (2000-2005);

Društvo sveučilišnih nastavnika (2000-).

ČLANSTVA U MEĐUNARODNIM ODBORIMA

ISEC – International Stirling Engine Councile (2007-).

11. POPIS RADOVA (CROSBI, https://bib.irb.hr/lista-radova?autor=218546):

A) Znanstveni radovi u časopisima citiranim u CC bazi (1);

B) Znanstveni radovi u drugim časopisima u bazi WOS (9);

C) Ostali radovi (38):

- **Plenarna izlaganja** (2)
- **Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom** (24)
- **Drugi radovi u zbornicima skupova s recenzijom** (4)
- **Sažeci u zbornicima skupova** (3)
- **Neobjavljena sudjelovanja na skupovima** (4)
- **Magistarski radovi** (1)

UKUPNO: 48 radova

A) Znanstveni radovi u časopisima citiranim u CC bazi:

1. Kurevija, T., Strpić, K., Koščak Kolin, S. (2018): Applying Petroleum Build-up Well Test Procedure on Thermal Response Test-Novel Method for Analyzing Temperature Recovery Period. Journal Energies, 11, 366, 1-22, Basel.

B) Znanstveni radovi u drugim časopisima u bazi WOS:

1. Koščak Kolin, S., Kurevija, T., Grebenar, D. (2018): Pressure Build-up Test Analysis of the Reservoir System with the Multiphase Flow. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 31, 3, 87-89, Zagreb.

2. Koščak Kolin, S. (2016): Proizvodno inženjerstvo nafte i plina-autor Marin Čikeš. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 33, 3, 75-84, Zagreb.

3. Koščak Kolin, S., Čikeš, M., Babić, V. (2013): Analiza testa porasta tlaka horizontalne bušotine. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 26, 1-27, Zagreb.

4. Koščak Kolin, S., Korenjak, Z., Čikeš, M. (2009): Modeliranje proizvodnog sustava bušotine opremljene plinskim liftom primjenom programa Prosper. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 21, 73-83, Zagreb.

5. Kolin, I., Mihelić-Bogdanić, A., Koščak Kolin, S. (2007): Historical Meaning of Textile Manufacture in Old Dubrovnik. Tekstil, 56, 2, 67-70, Zagreb.

6. Karasalihović, D., Maurović, L., Koščak Kolin, S. (2005): Geopolitical Role of Petroleum Industry in Creating Sustainable Business Strategies of Central European Oil Companies. Nafta, 56, 2, 87-92, Zagreb.

7. Koščak Kolin, S., Karasalihović, D., Maurović, L. (2005): Impact of Petroleum Production on Global Energy Demands. Nafta, 56, 2, 83-87, Zagreb.

8. Maurović, L., Karasalihović, D., Koščak Kolin, S. (2005): Technology for Sustainable Petroleum Industry Waste Disposal. Nafta, 56, 4, 161-166, Zagreb.

9. Golub, M., Kurevija, T., Koščak Kolin, S. (2004): Thermodynamic Cycle Optimization in the Geothermal Energy Production. Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik, 16, 65-69, Zagreb.

C) Ostali radovi:

Plenarna izlaganja

1. Koščak Kolin, S. (2017): Primjena novih metoda za analizu testa porasta tlaka slabo propusnih plinskih ležišta. XLVIII. Redovita godišnja skupština Sekcije za naftno rudarstvo Znanstvenog vijeća za naftu i plin Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti, HAZU, 10.03.2017, Zagreb.

2. Koščak Kolin, S., Jelić, K. (2003): Energetska učinkovitost uporabe bušotinskih izmjenjivača topline u sustavu s geotermalnom toplinskom crpkom. U: Zbornik radova s međunarodnog znanstveno-stručnog skupa o naftnom rudarstvu, Rakić, Lj. (ur.). INA-Industrija nafte d.d., 30.9-3.10.2003., Zagreb.

Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom

1. Mihelić-Bogdanić, A., Budin, R., Koščak Kolin, S. (2010): Process Energy Conservation Using Secondary Sources. U: Dragčević, Z. (ur.): 5th International Textile, Clothing & Desing Conference, Magic World of Textiles, Book of Proceedings, 3-6.10.2010., 932-937, Zagreb.

2. Budin, R., Mihelić-Bogdanić, A., Koščak Kolin, S. (2006): Advanced Concept for Polyester Producing Using CHP. U: Dragčević, Z. (ur.): 3rd International Textile, Clothing and Design Conference, Magic World of Textilies, Book of Proceedings, 8-11.10.2006., 961-965, Zagreb.

3. Mihelić-Bogdanić, A., Budin, R., Kolin, I., Koščak Kolin, S. (2006): Industrial Process Optimization Using Solar Energy, Condensate Recovery and Stirling engine. U: Franković, B. (ur.): 20th Scientific Conference on Energy and the Environment, Book of Proceedings, 25-27.10.2006., 381-386, Rijeka.

4. Golub, M., Kurevija, T., Koščak Kolin, S. (2005): Binary Rankine Cycle Optimization. U: Rakić, Lj. (ur.): 3. Međunarodni znanstveno-stručni skupa o naftnom rudarstvu, Book of Proceedings, 4-7.10.2005., 87-94, Zagreb.

5. Jelić, K., Kovačić, M., Koščak Kolin, S. (2005): State of the Art of the Geothermal Resources in Croatia in the Year 2004. World Geothermal Congress, Book of Proceedings, 24-29.4.2005., Antalya.

6. Golub, M., Kurevija, T., Koščak Kolin, S. (2004): Influence of the Joule-Thompson Effesct on Geothermal Energy Production at the Reservoir Velika Ciglena. U: Franković, B. (ur.): 19th Scientific Conference on Energy and the Environment, Book of Proceedings, 27-29.10.2004., 33-38, Rijeka.

7. Kolin, I., Koščak Kolin, S., Golub, M., Naso, V., Lucentini, M. (2003): Crucial Parameters for Wire Mesh Regenerator. U: Naso, V. (ur.): 11th Stirling Engine Conference (ISEC), Book of Proceedings, 19-21.11.2003., 38-45, Rim.

8. Koščak Kolin, S. (2002): Drying Wool by Means of Geothermal Energy. U: Dragčević, Z. (ur.): 1st International Textile, Clothing and Design Conference, Magic World of Textiles, Book of Proceedings, 6-9.10.2002., 702-708, Zagreb.

9. Koščak Kolin, S., Golub, M., Jelić, K. (2002): Downhole Heat Exchangers at Low Temperature Resources. U: Franković, B. (ur.): 18th International Congress Energy and the Environment, Book of Proceedings, 23-25.10.2002., 147-153, Rijeka.

10. Kolin, I., Naso, V., Golub, M., Koščak Kolin, S. (2001): Grapho-Analytical Method for Condensed Expression of Regenerator Efficiency. U: Laing, D. (ur.): 10th International Stirling Engine Conference, Book of Proceedings, 24-26.9.2001., 358-364, Osnabrück.

11. Koščak Kolin, S. (2001): Towards Further Development of the Low ΔT Engines. U: Laing, D. (ur.): 10th International Stirling Engine Conference, Book of Proceedings, 24-26.9.2001., 432-438, Osnabrück.

12. Koščak Kolin, S., Dong, W., Lucentini, M. (2001): Summarized Formula for Regenerator Efficiency Depending upon Aperture and Wire Diameter. U: Laing, D. (ur.):

10th International Stirling Engine Conference, Book of Proceedings, 24-26.9.2001., 370-376, Osnabrück.

13. Koščak Kolin, S., Kolin, I., Capata, R., Lucentini, M. (2001): Thermodynamical Influence of the Mesh Geometry on the Wire Mesh Regenerator. U: Laing, D. (ur.). 10th International Stirling Engine Conference, Book of Proceedings, 24-26.9.2001., 364-370, Osnabrück.

14. Kolin, I., Koščak Kolin, S., Golub, M. (2000): Geothermal Electricity Production by means of Low delta T Stirling Engine. U: Iglesias, E., Blackwell, D., Hunt, T., Lund, J. (ur.): World Geothermal Congress, Book of Proceedings, 28.5-10.6.2000., 3199-3203, Kyushu.

15. Koščak Kolin, S., Golub, M., Kolin, I., Naso, V., Lucentini, M. (2000): Influence of the Compression Ratio on Stirling and Otto Cycle. U: Beck, P. (ur.): European Stirling Forum, Book of Proceedings, 22-24.2.2000., 19-27, Osnabruck.

16. Koščak Kolin, S., Golub, M., Rajković, D. (2000): New Aspects of Direct Geothermal use in Croatia. U: Franković, B. (ur.): 17th Scientific Conference on Energy and the Environment, Book of Proceedings, 25-27.10.2000., 43-51, Rijeka.

17. Kolin, I., Koščak Kolin, S., Capata, R., Lucentini, M., Naso, V. (1999): ZRG Analysis of the First Patent on Stirling Engine. U: Capata, R. (ur.): 9th International Stirling Engine Conference, Book of Proceedings, 2-4.6.1999., 151-161, Rim.

18. Koščak-Kolin, S. (1999): Ecologycal Limit of the Flat Plate Engines. U: Capata, R. (ur.): 9th International Stirling Engine Conference, Book of Proceedings, 2-4.6.1999., 239-245, Rim.

19. Rajkovic, D., Golub, M., Koščak, S. (1999): Energetska i ekonomska opravdanost korištenja nisko temperaturnih geotermalnih polja u Hrvatskoj. 24th International Petroleum conference and exhibition-The Montana Press Programme Organizing, Book of Proceedings, 18-20.10.1999., Tihany.

20. Golub, M., Rajković, D., Koščak Kolin, S. (1998): Geothermal Potential in Energy Needs. U: Franković, B. (ur.): 16th Scientific Conference on Energy and the Environment, Book of Proceedings, 28-30.10.1998., 227-233, Rijeka.

21. Salopek, B., Koščak, S., Golub, M. (1998): Utjecaj geotermalnih i ugljenom loženih elektrana na kakvoću zraka. U: Franković, B. (ur.): 16th Scientific Conference on Energy and the Environment, Book of Proceedings, 28-30.10.1998., 259-266, Rijeka.

22. Koščak, S. (1997): Comparison of Isothermal and Adiabatic Approach to Stirling Motor. U: Bartolini, C. M. (ur.): 8th International Stirling Engine Conference, Book of Proceedings, 27-29.5.1997., 495-502, Ancona.

23. Koščak, S. (1997): Reflections about the Stirling Cycle Efficiency Diagram. U: Bartolini, C. M. (ur.): 8th International Stirling Engine Conference, Book of Proceedings, 27-29.5.1997., 659-665, Ancona.

24. Koščak, S. (1992): Atmospheric Pollution Caused by Increased Air Transport. U: Franković, B. (ur.): 13th Scientific Conference on Energy and the Environment, Book of Proceedings, 25-27.10.1992., 375-380, Rijeka.

Drugi radovi u zbornicima skupova s recenzijom

1. Koščak Kolin, S., Mihelić-Bogdanić, A., Naso, V. (2009): The First Cooler on a Computer Mainboard Powered by the Low DT Stirling Engine. U: Cipri, K. (ur.): 14th International Stirling Engine Conference, Book of Proceedings, 16-28.11.2009., 1-5, Gröningen.

2. Rajković, D., Golub, M., Koščak-Kolin, S. (2003): Profitability of Investment in the Low Temperature Geothermal Sources in Croatia. U: Agioutantis, Z. (ur.): International Conference on Sustainable Development Indicators in the Mineral Industries, Book of Proceedings, 21-23.5.2003., 217-223, Milos.

3. Koščak Kolin, S., Kolin, I. (1998): Pogon toplinskih pumpi prirodnim plinom pri kogeneraciji energije. U: Šerman, N. (ur.): Energetska i procesna postrojenja-Energetika marketing, Book of Proceedings, 3-5.6.1998., 451-455, Zagreb.

4. Koščak Kolin, S. (1997): Stope rasta prirodnog plina u 13 vodećih država. U: Pejčinović, V. (ur.): 12. Međunarodni susret stručnjaka za plin, Book of Proceedings, 7-9.5.1997., 61-69, Zagreb.

Sažeci u zbornicima skupova

1. Koščak Kolin, S. (2016): Well Production System Modelling and Sensitivity Analysis Example by Means of the Program Prosper. U: Croatian SPE Student Chapter: Annual

Student Energy Conference, Workshop, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 9-11.3.2016., Zagreb.

2. Koščak Kolin, S., Čikeš, M. (2010): Advances in Hydraulic Fracturing Technologies Applied to Tight Gas Sand Reservoirs. U: Dekanić, Igor (ur.): Petroleum Engineering Summer School, Workshop 29 - Exploration and Production of Hydrocarbon Reserves from Unconventional Deposits, 14-18.6.2010., Dubrovnik.

3. Koščak Kolin, S., Golub, M., Rajković, D. (2002): Impact of the Heat Power on the Unit Geothermal Energy Cost. U: Sayigh, A. A. M. (ur.): 7th World Renewable Energy Congress (WREN), 29.6-5.7.2002., Köln.

Neobjavljena sudjelovanja na skupovima

1. Koščak Kolin, S. (2017): Pressure Transient Analysis (Saphir module). U: Croatian SPE Student Chapter: Annual Student Energy Conference, Workshop, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 8-12.3.2017., Zagreb.

2. Koščak Kolin, S. (2016): Production System Modelling of Horizontal, Fractured and Horizontal Wells With Transverse Fractures in Program Prosper. U: Petroleum Engineering Summer School, Workshop 42 - Reservoir Evaluation and Management, 13-17.6.2016., Dubrovnik.

3. Koščak Kolin, S., Brkić, V. (2016): Lessons Learned from the Welltest Analysis Applied to the Unconventional reservoirs. U: Workshop - Low and Volatile Oil Price Environment. Technical Responses in the Pannonian Basin, 17.11.2016., Szolnok.

4. Koščak Kolin, S. (2007): Energy and Gross National Product (new book of late prof. em. Ivo Kolin), U: 16. Forum - Dan energije u Hrvatskoj, Hrvatsko energetsko društvo, 23.11.2007., Zagreb.

Magistarski rad

1. Koščak Kolin, S. (2000): Tehno-ekonomska analiza geotermalne energije u Hrvatskoj u usporedbi s europskim zemljama. Magistarski rad, RGN fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 121 str, Zagreb.