

# Određivanje proizvodnog potencijala bušotina u hidraulički frakturiranim tanko proslojenim ležištima plina

---

Lešković, Goran

Doctoral thesis / Disertacija

2021

*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:169:109566>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno 4.0 međunarodna](#)

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



*Repository / Repozitorij:*

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





Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni-fakultet

Goran Lešković

**ODREĐIVANJE PROIZVODNOG  
POTENCIJALA BUŠOTINA U  
HIDRAULIČKI FRAKTURIRANIM TANKO  
PROSLOJENIM LEŽIŠTIMA PLINA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2021.



Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni-fakultet

Goran Lešković

**ODREĐIVANJE PROIZVODNOG  
POTENCIJALA BUŠOTINA U  
HIDRAULIČKI FRAKTURIRANIM TANKO  
PROSLOJENIM LEŽIŠTIMA PLINA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: dr. sc. Vladislav Brkić

Zagreb, 2021.



University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Goran Lešković

**PRODUCTION POTENTIAL ESTIMATION  
FOR GAS WELLS PRODUCING FROM  
HYDRAULICALLY FRACTURED THIN  
LAYERS**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: dr. sc. Vladislav Brkić

Zagreb, 2021.



**MENTOR:**

Dr. sc. Vladislav Brkić

Izvanredni profesor RGN fakulteta sveučilišta u Zagrebu

## SAŽETAK

Težište istraživanja u ovom radu stavljeno je na procjenu proizvodnog potencijala frakturiranih tanko proslojenih ležišta plina. Takva ležišta susrećemo na lokalitetu Sjeverni Jadran koja su zbog problema kontrole proizvodnje nevezanog ležišnog materijala redovito opremljena i konvencionalnim pješčanim zasipima. Karakteristika tanko proslojenih ležišta lokaliteta Sjeverni Jadran su relativno velike debljine koje karakteriziraju vrlo male promjene u mehaničkim svojstvima pojedinih proslojaka. Svaki proslojak karakterizira i zasebno zasićenje fluidima te zasebni kontakt plin/voda. Za razliku od konvencionalnih ležišta gdje postoji relativno jasna granica u gradijentu loma pokrovnih i podinskih naslaga i samog ležišta, kod tanko proslojenih ležišta takva relativno jasna granica ne postoji. Zbog toga je razumijevanje procesa hidrauličkog frakturiranja, odnosno geometrije stvorene frakture u svim smjerovima (njene duljine, širine i posebice visine), od presudne važnosti za određivanje proizvodnog potencijala.

Kako bi se dobile vrijednosti maksimalno mogućeg proizvodnog potencijala frakturiranog tanko proslojenog ležišta, problem se svodi na zadovoljavanje matematičkog uvjeta gdje će dimenzije frakture i utisnuta masa podupirača projektirana u 3D simulatoru hidrauličkog frakturiranja biti jednaka, ili jednaka u granicama tehnički mogućeg, s istim teoretski optimalnim vrijednostima izračunatih pomoću *UFD* postupka (Economides et al., 2002). Glavni parametar koji povezuje ova dva modela je optimalna bezdimenzijska provodljivost frakture. Pomoću *UFD* postupka određuje se optimalna geometrija frakture (optimalna bezdimenzijska provodljivost) koja će za određenu masu utisnutog podupirača dati maksimalno mogući indeks proizvodnosti. Ovdje se kod određivanja indeksa proizvodnosti pretpostavi visina frakture i za tu se visinu određuje masa podupirača iz koje se posredno, preko broja podupirača, određuje optimalna širina i poluduljina frakture. Ovo je tzv. konvencionalni *UFD* pristup. Kod tanko proslojenih ležišta, prvenstveno zbog paralelnog rasta frakture kako u duljinu tako i u visinu, potreban je drugačiji pristup. Zbog toga je od presudne važnosti poznavanje ravnotežnih odnosa rasta frakture u svim smjerovima, njene širine, duljine i visine, kako bi se zadovoljio zahtjev za maksimalno mogućim indeksom proizvodnosti. Pri tome treba voditi računa o ograničenjima koja mogu biti uvjetovana ležištem, najčešće su to zone zasićenja slojnom vodom koje se ne smiju tretirati. Ograničenja mogu biti uvjetovana i raspoloživom opremom za frakturiranje kao što su snaga i kapacitet pumpnih agregata ili rezervoarskog prostora. Ostvarena geometrija frakture, osim fizikalnih karakteristika proslojaka na koje se ne može utjecati, zavisi od niza operativnih čimbenika poput odabira radnog fluida, podupirača,

adekvatnog plana pumpanja prethodnice i smjese radnog fluida i podupirača te koncentracije podupirača. To je kompleksan problem, zahtjeva iterativan postupak i okosnica je provedenog istraživanja. Zbog toga je kao znanstveni doprinos razvijena metoda koja će funkcionalno povezati proces hidrauličkog frakturiranja sa zahtjevom za maksimalno mogući indeks proizvodnosti. Uvođenjem ove metode postalo je moguće preciznije valorizirati stvarni proizvodni potencijal tanko proslojenih ležišta interdisciplinarnim spajanjem teorije i prakse korištenjem najnovijih dostignuća u rezoluciji i interpretaciji karotažnih mjerenja i mogućnosti korištenih računalnih modela zadnje generacije.

S ciljem potvrđivanja hipoteze da je osnovom procjene distribucije geomehničkih svojstava, efektivnog koeficijenta filtracije radnog fluida i propusnosti tanko proslojenih ležišta u kombinaciji s procjenom veličine smanjenja proizvodnosti bušotine kao posljedice tehnike proizvodnog opremanja ležišta/bušotine, moguće s relativno visokom razinom sigurnosti, odrediti njihov proizvodni potencijal, provedeno je istraživanje na tanko proslojenom ležištu PLQ-F u bušotinama SJ – 1 Dir i SJ – 2 Dir.

Na temelju pretpostavke da su za facijese sličnog karotažnog odraza, dakle sličnih debljina pješćanih tijela, sličnih udjela glina i silta te efektivnih poroziteta, njihova geomehnička te filtracijska i proizvodna svojstva slična ili ista, izvršena je kalibracija modela hidrauličkog frakturiranja ležišta PLQ-F u bušotini SJ – 1 Dir pomoću kalibriranog modela već izvršenog frakturiranja na istom ležištu u bušotini SJ – 2 Dir.

Provedena istraživanja za istražnu bušotinu SJ – 1 Dir pokazala su kako se frakturiranjem tanko proslojenih ležišta značajno može povećati njihov proizvodni potencijal u odnosu na konvencionalno opremanje bušotine. Primjenom nove metodologije moguće je odrediti takav program frakturiranja ležišta koji će rezultirati relativnim povećanjem proizvodnosti u odnosu na izvedeno stanje u iznosu 1,96. Istraživanja su pokazala da primjenom tehnike *Frac Pack* (FP) proizvodnost ležišta gotovo u potpunosti ovisi o geometriji frakture i propusnosti utisnutog podupirača, dok je utjecaj instalacije pješćanog zasipa na gubitak proizvodnosti ležišta zanemariv.

Na primjeru konvencionalnog *UFD* pristupa provedeno je istraživanje utjecaja visokih brzina protjecanja plina (efekta turbulencije plina) na procjenu proizvodnog potencijala ležišta. U ovom je istraživanju dokazano da zanemarivanje utjecaja tog efekta dovodi do preoptimističnih procjena indeksa proizvodnosti. Provedenim istraživanjem utjecaja „nesavršenosti“ geometrije frakture zaključeno je da je geometrija izračunata za bilo koji

dinamički tlak u bušotini unutar depresije na ležište od maksimalno 60%, optimalna i za svaki drugi uvjet dinamičkog tlaka. I na kraju, komparativnom analizom proizvodnog potencijala ležišta određenog konvencionalnim *UFD* pristupom i proizvodnog potencijala proizašlog iz primjene nove metode dokazano je da konvencionalni *UFD* pristup određivanja optimalne geometrije frakture može dovesti do nerealnih procjena indeksa proizvodnosti.

Provedenim istraživanjima za razradnu bušotinu SJ – 2 Dir, na istom ležištu, dokazano je kako se drugačijim pristupom, uz korištenje nove metodologije, može unaprijediti proces projektiranja hidrauličkog frakturiranja i postići bolji rezultat u smislu ostvarene proizvodnosti ležišta. Izrađen je program hidrauličkog frakturiranja kod kojeg je rezultirajuće relativno povećanje proizvodnosti u odnosu na proizvodnost postojeće hidrauličke frakture 1,68. Komparativnom analizom simulacija izvršenog hidrauličkog frakturiranja koja se temelji na originalnoj zonaciji i one koja se temelji na *TLA* zonaciji, uočene su velike razlike u rezultirajućim geometrijama frakture. Ovdje je zaključeno da je zbog preciznije definirane zonacije modela koji je baziran na *TLA* analizi rezultirajuća geometrija frakture vjerojatnija.

Ostvarenim vrijednostima relativnog povećanja proizvodnosti u odnosu na postojeće stanje proizvodnog opremanja u obje bušotine potvrđena je hipoteza doktorskog rada.

Znanstveni doprinos ovog rada očituje se u razvoju jedinstvene metodologije odabira optimalnog načina frakturiranja i proizvodnog opremanja ležišta u svrhu postizanja maksimalno mogućih indeksa proizvodnosti. Prikazana metodologija može se univerzalno primijeniti na tanko proslojenim ležištima različitih kompleksnosti bilo kojeg lokaliteta.

**Ključne riječi:** tanko proslojeno ležište, bezdimenzijski indeks proizvodnosti, hidrauličko frakturiranje, *Frac Pack*, pješčani zasip, *UFD* metoda.

## **EXTENDED ABSTRACT**

This research is focused on evaluating the production potential of fractured thin layered gas reservoirs. Such reservoirs, present in the North Adriatic locality, are regularly completed with conventional gravel packs due to the problem with controlling the production of unconsolidated reservoir material. Thin layered reservoirs in North Adriatic are characterized by relatively high thickness with minor changes in mechanical properties of individual layers. Each layer is also characterized by separate fluid saturation and separate gas/water contact. Unlike conventional reservoirs where the border between the fracture gradient of overlying and underlying deposits and the reservoir itself is relatively clear, there is no such clear border in thin layered reservoirs. Therefore, understanding the process of hydraulic fracturing, that is, the geometry of created fracture in every direction (its length, width and especially height) is essential for evaluating the production potential.

To calculate the value of maximum possible production potential of a fractured thin layered reservoir, the problem comes down to meeting the mathematical criterion where fracture dimensions and injected proppant mass designed in the 3D fracturing simulator will be equal, or equal within technically reasonable limits, to the same theoretically optimal values calculated with the UFD (Economides et al., 2002) model. The main parameter linking these two models is the optimum dimensionless conductivity of a fracture. UFD has successfully connected optimum fracture geometry (optimum dimensionless conductivity) that will generate maximum productivity index possible for a specific proppant mass injected. To set the productivity index, one must assume the fracture heights and then define the proppant mass accordingly. Using the proppant number enables direct definition of optimum width and half-length of a fracture. This is the so called conventional UFD approach. Thin layered reservoirs require different approach primarily due to parallel fracture growth in both length and high. Hence, to meet the requirement of a maximum productivity index possible, it is essential to have knowledge of fracture's growth relations in all directions, its width, height and length. In so doing one must keep in mind the limitations conditioned by the reservoir, most often being the zones with formation water saturation that cannot be treated, but also the limitations of available fracturing equipment such as power and capacity of pump units or reservoir space. Achieved fracture geometry, apart from the physical characteristics of layers that cannot be influenced, depends on the variety of operational factors such as the selection of a fracturing fluid, proppant and pumping schedule. It is a complex issue which requires iteration and is the backbone of this research. Therefore, a method has been developed that will functionally link

the hydraulic fracturing process and the requirement of maximum productivity index possible to serve as a scientific contribution. It enables a more precise valorisation of actual production potential of thin layered reservoirs by interdisciplinary joining theory and practice, using the latest developments in the resolution and interpretation of logging, and the possibilities offered by the most recent mathematical models used.

Aimed at confirming the hypothesis that it is possible to determine the production potential of reservoirs/wells with a relatively high level of certainty based on estimating the distribution of geomechanical properties, effective coefficient of working fluid filtration and permeability of thin layers, combined with estimation of the magnitude of well productivity decrease as a consequence of reservoir/well completion technique used, this research has been conducted on the thin layer reservoir PLQ-F in SJ – 1 Dir and SJ – 2 Dir wells.

Based on the assumption that geotechnical, filtration and production characteristics of facies of similar log reflection i.e. similar sand body thickness, clay and silt content and effective porosity are similar or identical, hydraulic fracturing model of PLQ-F reservoir in SJ – 1 Dir well model has been calibrated using a calibration model of already done fracturing on the same reservoir in SJ – 2 Dir well.

The research of the PLQ-F reservoir in SJ – 1 Dir exploration well proved that production potential of thin layered reservoirs can be significantly increased by fracturing compared to conventional well completion, while managing to control the reservoir material by injecting the appropriate proppant mesh into the reservoir and the annular space between the production casing and the gravel pack screen. It was proven that the effect of annular gravel pack installation on the total pressure loss can be considered negligible. Based on the conventional UFD approach, a research has been conducted also on the effect of high gas velocity (gas turbulence effect) on the estimation of well potential, proving that neglecting this effect when estimating the productivity index can lead to overoptimistic production profiles. The example of reservoir PLQ-F shows that the effect of high gas velocity is so significant that it can reduce the effective fracture permeability by more than six times compared to declared permeability. The fracture geometry calculated for any wellbore pressure within maximum reservoir drawdown of up to a maximum of 60% was proven optimal for any other dynamic pressure condition within that range.

It was proven that the application of new methodology can be used for determining the reservoir fracturing program that will result in fracture geometry, the difference of which when

compared to the one conditioned by the UFD model is negligible. Resulted folds of increase amounts to 1,96.

Research conducted on SJ – 2 Dir development well on the same reservoir showed that the process of hydraulic fracturing can be upgraded and that significantly better results can be achieved in terms of reservoir productivity, by using a different approach. In line with the simulation of performed hydraulic fracturing based on original zonation and the one based on the TLA zonation, major differences have been noted in the resulting fracture geometries. The model based on the TLA zonation undoubtedly suggests penetration into zones saturated with formation water, also confirmed by production history, which is not the case with the model based on original zonation. This points to the conclusion that the resulting geometry of the TLA model is more probable owing to a more precise definition of zonation. It was shown that the application of the new methodology enables determining the reservoir fracturing program that will result in optimum fracture geometry and consequently maximum possible productivity index and relative increase (folds of increase) of 1,68. Even more, if volumes of injected material are compared to the material consumption, it is cut in half. Finally, this points to the conclusion that this approach is not only likely to maximize productivity, but also to bring the hydraulic fracturing cost to an optimum level.

The paper's contribution to science is manifested in the development of a unique methodology for the selection of optimum fracturing program and completion of reservoirs in wells that produce gas from thin layered reservoirs, aiming to achieve maximum possible production index. The illustrated methodology can be universally applied to thin-layer reservoirs of different complexity and in any locality.

**Key words:** thin layered reservoirs, dimensionless productivity index, hydraulic fracturing, Frac Pack, gravel pack, UFD method.

Disertacija sadrži:

- 279 stranica teksta;
- 67 slika;
- 72 tablice;
- 9 priloga;
- popis literaturnih referenci s 56 navoda;
- sažetak s ključnim riječima na hrvatskom jeziku;
- prošireni sažetak s ključnim riječima na engleskom jeziku;
- životopis autora;
- popis radova s 5 objavljenih djela.



# SADRŽAJ

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA.....	xv
POPIS KORIŠTENIH KRATICA .....	xxiii
POPIS TABLICA.....	xxiv
POPIS SLIKA .....	xxx
1. UVOD.....	1
2. TANKO PROSLOJENA LEŽIŠTA – POJAM I PROCJENA DISTRIBUCIJE EFEKTIVNIH PROPUSNOSTI.....	5
2.1. Što su to tanko proslojena ležišta?.....	5
2.2. Određivanje distribucije propusnosti.....	5
3. TEORIJA ODREĐIVANJA PROIZVODNOG POTENCIJALA BUŠOTINA U HIDRAULIČKI FRAKTURIRANIM TANKO PROSLOJENIM LEŽIŠTIMA PLINA I PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA .....	10
3.1. Teorija određivanja proizvodnosti bušotina u nekonsolidiranim hidraulički frakturiranim tanko proslojenim ležištima plina i pregled relevantnih istraživanja.....	11
3.1.1. Jednadžba difuzije realnog plina u poroznoj sredini .....	11
3.1.2. Proizvodnost plinske bušotine kod neustaljenog stanja protjecanja .....	15
3.1.3. Proizvodnost plinske bušotine kod poluustaljenog stanja protjecanja .....	19
3.1.4. Koncept <i>skin</i> faktora.....	21
3.1.5. Bezdimenzijski indeks proizvodnosti kod poluustaljenog stanja protjecanja plinskih bušotina .....	24
3.1.6. Koncept efektivnog radijusa i ekvivalentnog <i>skin</i> faktora bušotine .....	24
3.1.7. Bezdimenzijski indeks proizvodnosti i ekvivalentni <i>skin</i> faktor frakturiranih ležišta kod poluustaljenog stanja protjecanja .....	25
3.1.8. Izdašnost dotoka .....	27
3.1.9. Procjena proizvodnog potencijala tanko proslojenih ležišta opremljenih konvencionalnim pješčanim zasipom u zacjevljenom kanalu bušotine .....	28
3.1.10. UFD (engl. <i>Unified Fracture Design</i> ) postupak procjene indeksa proizvodnosti hidraulički frakturiranih ležišta .....	30
3.1.11. Bezdimenzijski indeks proizvodnosti tanko proslojenih ležišta opremljenih tehnikom <i>Frac Pack</i> .....	47
3.2. Odabrana poglavlja iz teorije hidrauličkog frakturiranja .....	51

3.2.1.	Temeljne zakonitosti mehanike stijena i geometrije frakture .....	51
3.2.2.	Gubitci i efikasnost radnog fluida .....	56
3.2.3.	Matematički modeli za projektiranje hidrauličke frakture .....	58
4.	ODREĐIVANJE PROIZVODNOG POTENCIJALA BUŠOTINA U HIDRAULIČKI FRAKTURIRANIM TANKO PROSLOJENIM LEŽIŠTIMA PLINA .....	59
4.1.	Hidrauličko frakturiranje i proizvodno opremanje bušotina u tanko proslojenim ležištima plina lokaliteta Sjeverni Jadran .....	59
4.2.	Metodologija provedenih istraživanja .....	63
4.3.	Određivanje proizvodnog potencijala tanko proslojenog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir – konvencionalni UFD pristup .....	77
4.3.1.	Povijest radova i ulazni parametri konvencionalne <i>UFD</i> analize .....	77
4.3.2.	Petrofizikalna karakterizacija ležišta.....	78
4.3.3.	Proizvodna karakterizacija ležišta.....	81
4.3.4.	Proizvodni model – konvencionalni <i>UFD</i> pristup .....	84
4.3.5.	Diskusija o utjecaju velikih brzina protjecanja plina (turbulencije) .....	101
4.3.6.	Diskusija o utjecaju „nesavršenosti“ geometrije frakture .....	103
4.4.	Određivanje proizvodnog potencijala tanko proslojenog ležišta PLQ-F razradne bušotine SJ – 2 Dir .....	106
4.4.1.	Povijest radova i proizvodnje.....	106
4.4.2.	Petrofizikalna karakterizacija ležišta.....	106
4.4.3.	Proizvodna karakterizacija ležišta.....	108
4.4.4.	Geomehanička i filtracijska karakterizacija ležišta.....	113
4.4.5.	Izrada dijagrama ravnotežnih odnosa geometrije frakture.....	122
4.4.6.	Modeliranje teoretski optimalne geometrije frakture.....	124
4.4.7.	Izrada optimalnog programa izvođenja hidrauličkog frakturiranja.....	127
4.4.8.	Izrada <i>FP</i> proizvodnog modela.....	130
4.4.9.	Diskusija o rezultatima istraživanja u bušotini SJ – 2 Dir .....	133
4.5.	Određivanje proizvodnog potencijala tanko proslojenog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.....	138
4.5.1.	Geomehanička i filtracijska karakterizacija ležišta.....	138
4.5.2.	Izrada karte ravnotežnih odnosa geometrije frakture.....	140
4.5.3.	Modeliranje teoretski optimalne geometrije frakture.....	142
4.5.4.	Izrada optimalnog programa izvođenja hidrauličkog frakturiranja.....	145

4.5.5.	Izrada <i>FP</i> proizvodnog modela .....	148
4.5.6.	Diskusija o rezultatima istraživanja u bušotini SJ – 1 Dir .....	151
5.	ZAKLJUČAK .....	156
6.	LITERATURA .....	162
7.	PRILOZI .....	166
7.1.	PRILOG 1. Proizvodnost plinske bušotine kod poluustaljenog stanja protjecanja....	166
7.2.	PRILOG 2. Gubitak tlaka u perforacijama ispunjenim podupiračem i anularnom sustavu pješčanog zasipa. ....	177
7.3.	PRILOG 3. Rezultati proračuna proizvodnog potencijala ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir .....	183
7.4.	PRILOG 4. Rezultati <i>TLA</i> analize i izračuna distribucije efektivnih propusnosti šireg područja ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir .....	186
7.5.	PRILOG 5. Korekcije svojstava ležišta PLQ-F u bušotini SJ – 2 Dir.....	199
7.6.	PRILOG 6. Dijagram ravnotežnih odnosa geometrije frakture u funkciji veličine protoka prethodnice ležišta PLQ-F u bušotini SJ – 2 Dir.....	213
7.7.	PRILOG 7. Rezultati proračuna proizvodnog potencijala ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir	214
7.8.	PRILOG 8. Rezultati proračuna proizvodnog potencijala ležišta PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir	217
7.9.	PRILOG 9. Dijagram ravnotežnih odnosa geometrije frakture u funkciji veličine protoka prethodnice ležišta PLQ-F u bušotini SJ - Dir.....	239
8.	ŽIVOTOPIS .....	240

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

- $A$  – drenažna površina,  $m^2$ ;
- $a$  – bezdimenzijski parametar u jednađbi (2.1), poluduljina horizontalne bušotine;
- $a_c$  – koeficijent pravca linearne funkcije u jednađbi (4.1),  $\frac{m \cdot \min^{-1/2}}{mD}$ ;
- $B$  – volumetrijski koeficijent,  $m^3 m_{sc}^{-3}$ ;
- $b$  – bezdimenzijski parametar u jednađbama (2.1), (3.71), (3.72) i (3.73), širina oštećene pribušotinske zone,  $m$ ;
- $b_c$  – odsječak na osi koeficijenta filtracije u jednađbi (4.1),  $m \cdot \min^{-1/2}$ .
- $b_i$  – odsječak na osi  $y$  i-tog proslojka jednađbe (3.124),  $Pa$ ;
- $C$  – provodljivost frakture,  $m^2 m, mDm$ ; efektivni koeficijent filtracije,  $m \cdot \min^{-1/2}$ ;
- $C_A$  – koeficijent drenažnog oblika, bezdimenzionalan;
- $c$  – stlačivost,  $Pa^{-1}, bar^{-1}$ ; bezdimenzijski parametar u jednađbi (2.1), poluvisina frakture u jednađbama (3.125) i (3.126), (-) znači u smjeru vrha frakture,  $m$ ;
- $\bar{C}$  – srednji efektivni koeficijent filtracije,  $m \cdot \min^{-1/2}$ ;
- $C_c$  – efektivni koeficijent filtracije koji je kontroliran propusnošću ležišta,  $m \cdot \min^{-1/2}$ ;
- $C_{fD}$  – bezdimenzijska provodljivost frakture;
- $C_i$  – efektivni koeficijent filtracije i-tog proslojka,  $m \cdot \min^{-1/2}$ ;
- $C_e$  – efektivni koeficijent filtracije koji je kontroliran propusnošću ležišta,  $m \cdot \min^{-1/2}$ ;

- $C_v$  – efektivni koeficijent filtracije koji je kontroliran efektivnom propusnosti ležišta za filtrat,  $m \cdot \text{min}^{-1/2}$ ;
- $C_w$  – efektivni koeficijent filtracije koji je kontroliran propusnošću filterskog obloga,  $m \cdot \text{min}^{-1/2}$ ;
- $D$  – faktor visoke brzine protjecanja fluida, koeficijent turbulencije,  $\left(m^3/s\right)^{-1}$ ,  $\left(m^3/dan\right)^{-1}$ ;
- $d_{mid}$  – dubina sredine frakture,  $m$ ;
- $d_{ref}$  – referentna dubina u bušotini (sredina perforacija),  $m$ ;
- $d_p$  – promjer perforacija,  $m$ ;
- $dp$  – promjena tlaka,  $Pa$ ,  $bar$ ;
- $dr$  – promjena radijusa,  $m$ ;
- $dh$  – promjena visine,  $m$ ;
- $E$  – Youngov modul elastičnosti,  $Pa$ ,  $bar$ ;
- $F$  – faktor oštećenja, bezdimenzionalan;
- $FE$  – izdašnost dotoka, bezdimenzionalan;
- $f$  – funkcija;
- $G$  – Posmični modul,  $Pa$ ,  $bar$ ;
- $G_f$  – frakturni gradijent,  $Pa/m$ ,  $bar/m$ ;
- $h$  – debljina ležišta,  $m$ ;
- $h_i$  – debljina i-tog proslojka,  $m$ ;
- $I$  – penetracijski odnos, bezdimenzionalan;
- $I_{ani}$  – indeks anizotropije ležišta, bezdimenzionalan;

- $J$  – indeks proizvodnosti,  $(m^3/dan)bar^{-1}$  za naftu,  $(m^3/dan)(bar^2/cP)^{-1}$  za plin;
- $J_D$  – bezdimenzijski indeks proizvodnosti;
- $k$  – koeficijent propusnosti ležišta,  $m^2, mD$ ;
- $\bar{k}$  – koeficijent propusnosti ležišta,  $m^2, mD$ ;
- $k'$  – ekvivalentni koeficijent propusnosti ležišta,  $m^2, mD$ ;
- $k_e$  – koeficijent propusnosti ležišta za filtrat radnog fluida,  $m^2, mD$ ;
- $k_{rgc}$  – koeficijent relativne propusnosti ležišta za plin pri kritičnom zasićenju kondenzatom, dio jedinice;
- $k_w$  – koeficijent propusnosti filtarskog obloga,  $m^2, mD$ ;
- $K$  – volumenski modul elastičnosti,  $Pa, bar$ ;
- $K_{IC,i}$  – kritični intenzitet naprezanja ili žilavost i-tog proslojka,  $Pa\sqrt{m}$ ;
- $K_{I-}, K_{I+}$  – intenzitet naprezanja u krovinskom odnosno podinskom vrhu frakture,  $Pa\sqrt{m}$
- $L$  – duljina,  $m$ ;
- $M$  – molarna masa,  $kg/mol$ ;
- $M_z$  – molarna masa zraka,  $0,028964 kg/mol$ ;
- $m(p)$  – funkcija pseudotlaka,  $Pa^2/Pa \times s, bar^2/cP$ ;
- $m$  – masa,  $kg$ , hidrostatski gradijent u jednadžbi (3.124),  $Pa m^{-1}$ ;
- $m_D$  – bezdimenzijski pseudotlak realnog plina, bezdimenzionalan;
- $N$  – broj (nečega);
- $N_{prop}$  – broj podupirača, bezdimenzionalan;

$n$	–	broj perforacija po dužnom metru (gustoća napucavanja), $\frac{1}{m}$ ;
$p$	–	tlak, <i>bar</i> ;
$\bar{p}$	–	srednji tlak, <i>bar</i> ;
$P_{mid}$	–	tlak na dubini sredine frakture, <i>Pa</i> ;
$P_{net}$	–	efektivni tlak u frakturi, <i>Pa</i> ;
$P_{ref}$	–	tlak na referentnoj dubini bušotine (sredine perforacija), <i>Pa</i> ;
$R$	–	opća plinska konstanta, $8,3145 \frac{J}{K \text{ mol}}$ ;
$r$	–	radijus, <i>m</i> ;
$r_D$	–	bezdimenzijski radijus, bezdimenzionalan;
$r'_w$	–	efektivni radijus bušotine, <i>m</i> ;
$q$	–	protok, proizvodnja fluida, $\frac{m^3}{s}$ , $\frac{m^3}{dan}$ ;
$S$	–	zasićenje, dio jedinice;
$s$	–	<i>skin</i> faktor, <i>skin</i> efekt;
$T$	–	temperatura, <i>K</i> , $^{\circ}C$ ;
$TVD$	–	vertikalna dubina, <i>m</i> ;
$t$	–	vrijeme, <i>s</i> ;
$t_D$	–	bezdimenzijsko vrijeme, bezdimenzionalan;
$tipu$ , $tipd$	–	dubina krovinskog, odnosno podinskog vrha frakture, <i>Pa</i> ;
$\bar{u}$	–	brzina filtracije fluida, $\frac{m}{s}$ ;
$V$	–	volumen, $m^3$ ;
$V_{drenažni}$	–	drenažni volumen ležišta, $m^3$ ;
$V_f$	–	volumen frakture, $m^3$ ;

$V_{prop-1krilo}$	–	volumen jednog krila frakture ispunjene podupiračem, $m^3$ ;
$V_{prop-2krila}$	–	volumen frakture ispunjene podupiračem, $m^3$ ;
$Z$	–	faktor odstupanja plina, bezdimenzionalan;
$Z_m$	–	vertikalna udaljenost od krovine ležišta do sredine perforacija, $m, ft$ ;
$v$	–	brzina protjecanja fluida, $m/s$ ;
$\bar{v}$	–	srednja brzina protjecanja fluida, $m/s$ ;
$\alpha$	–	konverzijska konstanta;
$\beta$	–	faktor turbulencije, $1/m$ ;
$\beta'$	–	modificirani faktor turbulencije, $1/m$ ;
$\gamma$	–	relativna gustoća (specifična težina), dio jedinice, tangencijalna deformacija, bezdimenzionalan;
$\Delta$	–	razlika;
$\varepsilon$	–	deformacija, bezdimenzionalan;
$\varepsilon_v$	–	relativna promjena volumena tijela, bezdimenzionalan;
$\eta$	–	efikasnost fluida za frakturiranje, bezdimenzionalan;
$\mu$	–	viskoznost fluida, $Pa \cdot s, cP$ ;
$\mu_a$	–	prividna viskoznost filtrata radnog fluida, $Pa \cdot s, cP$ ;
$\nu$	–	Poissonov omjer, bezdimenzionalan;
$\rho$	–	gustoća fluida, $kg/m^3$ ;
$\varphi$	–	šupljikavost stijene, dio jedinice;
$\Phi$	–	šupljikavost, dio jedinice;
$\Phi_{total}$	–	ukupna šupljikavost, dio jedinice;



$\Phi_{bound}$  – udio koji zauzima strukturno vezana voda u mineralima glina u ukupnoj šupljikavosti, dio jedinice;

$\Phi_{free}$  – udio koji zauzima pokretna voda u ukupnoj šupljikavosti, dio jedinice;

$\sigma$  – naprezanje,  $Pa, bar$  ;

$\sigma_{ff}$  – efektivno naprezanje koje djeluje na podupirač frakture,  $Pa, bar$  ;

$\sigma_i$  – minimalno horizontalno naprezanje i-tog proslojka,  $Pa$  ;

$\theta$  – devijacija bušotine,  $^{\circ}$  ;

$x$  – horizontalna duljina, koordinata dubine u jednadžbama (3.124), (3.125) i (3.126),  $m$  ;

$Y$  – faktor retrogradne kondenzacije,  $1/bar$  ;

$y$  – horizontalna širina,  $m$  ;

$\tau$  – tangencijalna deformacija, bezdimenzionalan;

$w$  – širina frakture,  $m$  ;

$\xi$  – koeficijent proporcionalnosti apsolutne i efektivne propusnosti ležišta, dio jedinice;

$\xi_C$  – koeficijent korekcije filtracije, dio jedinice;

$\xi_{NMR}$  – koeficijent korekcije propusnosti izmjerene NMR karotažnim mjerenjima u odnosu na propusnost dobivenom iz hidrodinamskih mjerenja (i/ili miniDST mjerenja), dio jedinice;

#### Indeksi

$A$  – površina, drenažni oblik;

$b$  – blokade kondenzata;

$c$  – parcijalnog raskrivanja ležišta, zatvaranja frakture, kritično;

$ck$  – prigušenja frakture;

$D$	–	bezdimenzijski;
$d$	–	oštećene zone;
$dp$	–	kompaktne zone perforacija;
$e$	–	na granici drenaže;
$ef$	–	efektivno;
$f$	–	frakture;
$fD$	–	bezdimenzijski frakture;
$ff$	–	lica frakture;
$ff, d$	–	kombinirano oštećenje lica frakture i oštećenje pribušotinske zone;
$filtracije$	–	filtracije radnog fluida;
$G$	–	pješčanog zasipa;
$g$	–	plina;
$gel$	–	gela;
$gubitaka$	–	gubitaka radnog fluida;
$H$	–	horizontalno;
$inic.$	–	inicijalno;
$korig.$	–	korigirano;
$max$	–	maksimalno;
$NMR$	–	dobiveno NMR (eng. <i>Nuclear Magnetic Resonance</i> ) mjerenjima;
$o$	–	nafte;
$opt$	–	optimalno;
$p$	–	perforacija;
$popr.$	–	poprečno;

<i>prop</i>	–	podupirača;
<i>prop–1krilo</i>	–	podupirača u jednom krilu frakture;
<i>prop–2krila</i>	–	podupirača u oba krila frakture;
<i>R</i>	–	ležišta;
<i>Re</i>	–	Reynoldsov;
<i>s</i>	–	koji uključuje <i>skin</i> , oštećena zona;
<i>sc</i>	–	pri uvjetima standardnog tlaka 1,01325 <i>bar</i> i standardne temperature 15 °C (288,15 <i>K</i> );
<i>TIM</i>	–	prema metodi Timur-a;
<i>v</i>	–	vertikalna;
<i>w</i>	–	bušotine;
<i>wc</i>	–	korigirani bušotine;
<i>wf</i>	–	u dinamičkim uvjetima na razini perforacija bušotine;
<i>WT</i>	–	„well test“, za vrijeme ispitivanja bušotine;
<i>x</i>	–	u horizontalnom smjeru, smjeru osi <i>x</i> ;
$\Theta$	–	uslijed devijacije bušotine;
'	–	za, kod;

## POPIS KORIŠTENIH KRATICA

- FMI - karotažno mjerenje za zonaciju facijesa (engl. *Full Bore Microimager*);
- FP - metoda proizvodnog opremanja ležišta/bušotina koja kombinira tehnologiju hidrauličkog frakturiranja ležišta i konvencionalnog pješčanog zasipa (engl. *Frac-and-Pack* ili samo *Frac Pack*);
- MMDD - karotažno mjerenje za izračun volumena glina (engl. *Multifrequency Measurement of Dielectric Dispersion*);
- NMR - karotažno mjerenje za proračun distribucije propusnosti na tanko proslojenim ležištima (engl. *Nuclear Magnetic Resonance*);
- IPTT - „mini“ proizvodno testiranje (engl. *Interval Pressure Transient Testing*);
- TLA - analiza tanko proslojenih ležišta (engl. *Thin Layer Analysis*);
- UFD - optimalizacijski model određivanja optimalne geometrije frakture u svrhu maksimiziranja indeksa proizvodnosti (engl. *Unified Fracture Design*);
- WFT - modularni sustavi za proizvodno testiranje ležišta u bušotinama nošeni na kablju ili bušaćim šipkama (engl. *Wireline Formation Testing*);

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Zavisnost propusnosti frakture $k_f$ i faktora turbulencije $\beta$ o efektivnom naprezanju frakture $\sigma_{ff}$ za podupirač Econoprop (izvor CarboCeramics.com) .....	42
Tablica 2. Rezultati ekstrapolacije rješenja simulacije za maksimalne poluduljine frakture kod tri odabrana protoka prethodnice.....	73
Tablica 3. Ulazni podaci za modeliranje teoretski optimalne geometrije frakture u proširenom rasponu protoka prethodnice. ....	73
Tablica 4. Rezultati proračuna teoretski optimalne geometrije frakture za tri odabrana protoka prethodnice. ....	74
Tablica 5. Srednje vrijednosti petrofizikalnih parametara ležišta PLQ-F u bušotini SJ – 1 Dir, preuzeto iz INA (2014). ....	78
Tablica 6. Rezultati interpretacije testa porasta tlaka na ležištu PLQ-F u bušotini SJ – 1 Dir, preuzeto iz INA-e (2013). ....	81
Tablica 7. Ulazni podaci za proračun optimalnog indeksa proizvodnosti i geometrije frakture na ležištu PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir. ....	84
Tablica 8. Zavisnost tlakova u bušotini i proizvodnje plina te teoretske vrijednosti komponenti <i>skina</i> i efektivnih propusnosti kao posljedice frakturiranja u ležištu PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.....	94
Tablica 9. Rezultati proračuna proizvodnosti idealno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir uporabom jednadžbe (3.113). ....	96
Tablica 10. Ulazni parametri za proračun oštećenja kao posljedice protjecanja plina u perforacijama ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir. ....	97
Tablica 11. Ulazni parametri za proračun oštećenja kao posljedice protjecanja plina u anularnom sustavu pješčanog zasipa ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir. ....	98
Tablica 12. Rezultati proračuna indikatorske krivulje i bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir opremljenog tehnikom FP.....	101
Tablica 13. Sumarni prikaz proizvodnih pokazatelja idealne <i>IPR</i> krivulje dobivenih iterativnim <i>UFD</i> postupkom ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir. ....	104

Tablica 14. Osrednjene vrijednosti distribucije petrofizikalnih parametara šire zone ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir (INA-ENI 2014). .....	107
Tablica 15. Rezultati interpretacije hidrodinamskih mjerenja za efektivnu debljinu ležišta PLQ-F od 3,85 m u bušotini SJ - 2 Dir (INAgip 2015-2020). .....	110
Tablica 16. Rezultati interpretacije hidrodinamskih mjerenja za efektivnu debljinu ležišta PLQ-F od 8,92 m u bušotini SJ - 2 Dir (INAgip 2015-2020). .....	110
Tablica 17. Ulazni podaci za proračun indeksa proizvodnosti temeljem <i>HDM</i> iz ožujka 2015. ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	111
Tablica 18. Rezultati proračuna proizvodnog modela frakturiranog tanko proslojenog ležišta PLQ-F u bušotini SJ – 2 Dir temeljenog na hidrodinamskim mjerenjima iz ožujka 2015. ...	111
Tablica 19. Originalni program izvođenja hidrauličkog frakturiranja za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	113
Tablica 20. Mehanička svojstva i ukupni koeficijenti filtracije temeljeni na originalnoj zonaciji i simulaciji ponašanja efektivnog tlaka tijekom frakturiranja u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	115
Tablica 21. Rezultati simulacije glavnih parametara frakture za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir temeljenoj na originalnoj zonaciji. ....	116
Tablica 22. Korelativni koeficijenti distribucije ukupnog koeficijenta filtracije radnog fluida u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	117
Tablica 23. Originalni program izvođenja hidrauličkog frakturiranja za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir temeljen na <i>TLA</i> analizi. ....	117
Tablica 24. Mehanička svojstva i srednji efektivni koeficijenti filtracije temeljeni na <i>TLA</i> analizi i simulaciji ponašanja efektivnog tlaka tijekom frakturiranja u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	118
Tablica 25. Komparativni prikaz rezultata simulacije glavnih parametara frakture za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir temeljene na originalnoj i <i>TLA</i> zonaciji. ....	120
Tablica 26. Razlika mjerenih i simuliranih tlakova u bušotini i efektivnih tlakova na razini perforacija kod originalne i <i>TLA</i> zonacije u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	122
Tablica 27. Ekstrapolirana pojedinačna rješenja simulacije iz dijagrama ravnotežnih odnosa za točke maksimalne poluduljine frakture u ležištu PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	123

Tablica 28. Ulazni podaci za proračun maksimalnog indeksa proizvodnosti i teoretski optimalne geometrije frakture po <i>UFD</i> proceduri na ležištu PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.....	124
Tablica 29. Rezultati proračuna teoretski optimalne geometrije frakture za svaki razmatrani protok prethodnice za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	125
Tablica 30. Optimalni program izvođenja hidrauličkog frakturiranja za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.....	127
Tablica 31. Rezultati simulacije glavnih parametara optimalno dizajnirane frakture za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	129
Tablica 32. Zavisnost tlakova u bušotini i proizvodnje plina te vrijednosti komponenti <i>skina</i> kod posljedice frakturiranja optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir prema <i>UFD</i> proceduri. ....	131
Tablica 33. Rezultati proračuna proizvodnog modela temeljem <i>UFD</i> procedure optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.....	132
Tablica 34. Ulazni parametri za proračun oštećenja kao posljedice protjecanja plina u perforacijama optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	132
Tablica 35. Vrijednosti linearnog <i>skin</i> efekta uslijed protjecanja u perforacijama i odgovarajućeg efekta visokih brzina protjecanja fluida optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	132
Tablica 36. Ulazni parametri za proračun oštećenja kao posljedice protjecanja plina u anularnom sustavu pješčanog zasipa optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	132
Tablica 37. Vrijednosti <i>skin</i> efekta uslijed linearnog protjecanja u sustavu anularnog pješčanog zasipa i odgovarajućeg efekta visokih brzina protjecanja fluida optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	133
Tablica 38. Vrijednosti ukupnog linearni <i>skin</i> faktora i odgovarajućeg ukupnog efekta visokih brzina protjecanja fluida optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir opremljenog tehnikom <i>FP</i> .....	133
Tablica 39. Rezultati proračuna proizvodnog modela optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir opremljenog tehnikom <i>FP</i> . ....	133

Tablica 40. Razlika korigiranih vrijednosti geomehaničkih i filtracijskih svojstava zona/proslojaka/litologija <i>TLA</i> u odnosu na originalnu zonaciju u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	135
Tablica 41. Ključni proizvodni parametri i geometrija optimalno dizajnirane frakture i teoretskih maksimalnih vrijednosti i njihove razlike za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir..	136
Tablica 42. Mehanička svojstva i srednji efektivni koeficijenti filtracije u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir. ....	138
Tablica 43. Ekstrapolirana pojedinačna rješenja simulacije iz dijagrama ravnotežnih odnosa za točke maksimalne poluduljine frakture u ležištu PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir. ....	140
Tablica 44. Ulazni podaci za proračun maksimalnog indeksa proizvodnosti i teoretski optimalne geometrije frakture po <i>UFD</i> proceduri na ležištu PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir. ....	142
Tablica 45. Rezultati proračuna teoretski optimalne geometrije frakture za svaki razmatrani protok prethodnice za ležište PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir. ....	143
Tablica 46. Programa izvođenja optimalne frakture za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir. ....	145
Tablica 47. Rezultati simulacije glavnih parametara optimalno dizajnirane frakture za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir. ....	146
Tablica 48. Zavisnost tlakova u bušotini i proizvodnje plina te vrijednosti komponenti <i>skina</i> kao posljedice frakturiranja optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir prema <i>UFD</i> proceduri. ....	148
Tablica 49. Rezultati proračuna proizvodnosti optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir temeljem <i>UFD</i> postupka. ....	150
Tablica 50. Ulazni parametri za proračun oštećenja kao posljedice protjecanja plina u perforacijama optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir. ....	150
Tablica 51. Vrijednosti linearnog <i>skin</i> efekta uslijed protjecanja u perforacijama i odgovarajućeg efekta visokih brzina protjecanja fluida optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir. ....	150
Tablica 52. Vrijednosti <i>skin</i> efekta uslijed linearnog protjecanja u sustavu anularnog pješčanog zasipa i odgovarajućeg efekta visokih brzina protjecanja fluida optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir. ....	150



Tablica 53. Vrijednosti ukupnog linearnog <i>skin</i> faktora i odgovarajućeg ukupnog efekta visokih brzina protjecanja fluida optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir opremljenog metodom <i>FP</i> .....	151
Tablica 54. Rezultati proračuna proizvodnog modela optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir opremljenog tehnikom <i>FP</i> .....	151
Tablica 55. Usporedba ključnih proizvodnih pokazatelja i geometrije frakture prema <i>UFD</i> proračunu i prema optimalno dizajniranom programu hidrauličkog frakturiranja te njihove razlike za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir. ....	152
Tablica 56. Usporedba ključnih proizvodnih pokazatelja i geometrije frakture prema konvencionalnom <i>UFD</i> proračunu i prema optimalno dizajniranom programu hidrauličkog frakturiranja te njihove razlike za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir. ....	153
Tablica 57. Rezultati iterativnog proračuna <i>UFD</i> modela za dinamički tlak $p_{wf} = 99,70 \text{ bar}$ ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir. ....	183
Tablica 58. Rezultati iterativnog proračuna <i>UFD</i> modela za teoretski optimalnu poluduljinu frakture 24,71 m i dinamički tlak $p_{wf} = 99,70 \text{ bar}$ u ležištu PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir. ....	183
Tablica 59. Rezultati iterativnog proračuna proizvodnosti ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir kod teoretski optimalnih parametara frakture prema konvencionalnom <i>UFD</i> modelu. ....	184
Tablica 60. Rezultati iterativnog proračuna proizvodnosti ležišta PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir prema <i>UFD</i> modelu za optimalnu poluduljinu frakture $x_{f,opt} = 24,74 \text{ m}$ , optimalnu širinu frakture $w_{opt} = 3,87 \text{ mm}$ i srednju visinu frakture $h_{ef,f} = 7,86 \text{ m}$ .....	185
Tablica 61. Rezultati <i>TLA</i> analize i izračuna distribucije efektivnih propusnosti šireg područja ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.....	186
Tablica 62. Korekcije mehaničkih svojstava ležišta PLQ-F u bušotini SJ – 2 Dir. ....	199
Tablica 63. Korekcije propusnosti i ukupnog koeficijenta filtracije ležišta PLQ-F u bušotini SJ – 2 Dir.....	199
Tablica 64. Korigirani geomehanički parametri i ukupni koeficijenti filtracije proslojaka šireg područja ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.....	200

Tablica 65. Indikatorska krivulja ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir generirana temeljem hidrodinamskih mjerenja iz ožujka 2015. ....	214
Tablica 66. Rezultati iterativnog proračuna <i>UFD</i> modela za teoretski optimalnu poluduljinu frakture 27,02 m i dinamički tlak $p_{wf} = 112,09 \text{ bar}$ u ležištu PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir....	214
Tablica 67. Rezultati iterativnog proračuna proizvodnosti ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir prema <i>UFD</i> modelu za teoretski optimalnu poluduljinu frakture 27,02 m i dinamički tlak $p_{wf} = 112,09 \text{ bar}$ .....	215
Tablica 68. Zavisnost tlakova u bušotini i proizvodnje plina (indikatorska krivulja) te vrijednosti komponenti <i>skina</i> za teoretski optimalnu poluduljinu frakture 27,02 m i dinamički tlak $p_{wf} = 112,09 \text{ bar}$ u ležištu PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir .....	215
Tablica 69. Rezultati iterativnog proračuna proizvodnosti ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir prema <i>UFD</i> modelu za optimalnu poluduljinu frakture $x_{f,opt} = 27,01 \text{ m}$ , optimalnu širinu frakture $w_{opt} = 6,12 \text{ mm}$ i srednju visinu frakture $h_{ef,f} = 8,84 \text{ m}$ .....	216
Tablica 70. Korekcije propusnosti i ukupnog koeficijenta filtracije ležišta PLQ-F u bušotini SJ – 1 Dir.....	217
Tablica 71. Rezultati <i>TLA</i> analize i izračuna distribucije efektivnih propusnosti šireg područja ležišta PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir.....	217
Tablica 72. Geomehanički parametri i ukupni koeficijenti filtracije proslojaka šireg područja ležišta PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir.....	228

## POPIS SLIKA

Slika 1. Grafički prikaz definicije pojma tanko proslojenih ležišta (engl. <i>thin layers</i> ili <i>thin beds</i> ), preuzeto od Baker Atlasa.....	6
Slika 2. Radijus obuhvata pojedinih metoda za procjenu propusnosti ležišta, preuzeto od Cantini et al. (2013). .....	7
Slika 3. Tipska krivulja za neograničeni radijalni sustav, konstantnog protoka na unutarnjoj granici (preuzeto iz Čikeš 2015). .....	19
Slika 4. Pojednostavljeni prikaz strujnog toka fluida i karakterističnih <i>skin</i> efekata konvencionalno zacijevljene bušotine s perforacijama u području ležišta bez pješčanog zasipa. ....	23
Slika 5. Korelativni odnos bezdimenzijske provodljivost frakture $C_{fD}$ i funkcije $f(C_{fD})$ (Cinco-Ley i Samaniego, 1981). .....	26
Slika 6. Model pritjecanja plina iz tanko proslojenog ležišta u konvencionalno zacijevljenu bušotinu s perforacijama opremljenu pješčanim zasipom.....	29
Slika 7. Model vertikalne frakture unutar kružne odnosno kvadratne drenažne površine - volumena, preuzeto iz Valko (2006). .....	31
Slika 8. Model vertikalne frakture unutar kvadratnog drenažnog volumena, preuzeto iz Valko (2006). .....	31
Slika 9. McGuire & Sikora (1960) prezentacija bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti $J_{fD}$ kao funkcije bezdimenzijske provodljivosti frakture i penetracijskog odnosa $I_x$ , preuzeto iz Valko (2006). .....	33
Slika 10. Bezdimezijski indeks proizvodnosti $J_{fD}$ kao funkcija bezdimenzijske provodljivosti frakture $C_{fD}$ i broja podupirača $N_{prop}$ , za $N_{prop} \leq 0,1$ , preuzeto iz Valko (2006).....	33
Slika 11. Bezdimezijski indeks proizvodnosti $J_{fD}$ kao funkcija bezdimenzijske provodljivosti frakture $C_{fD}$ i broja podupirača $N_{prop}$ , za $N_{prop} \geq 0,1$ , preuzeto iz Valko (2006).....	34
Slika 12. Model oštećenja lica frakture (Cinco-Ley et al., 1977). .....	37

Slika 13. Model kombiniranog <i>skina</i> uslijed oštećenja lica frakture i oštećenja pribušotinske zone prema (Mathur et al., 1995). .....	38
Slika 14. Model prigušene frakture (Romero et al., 2002).....	38
Slika 15. Grafički prikaz određivanja ekvivalentnog linearnog <i>skina</i> uslijed frakturiranja $s_f$ i ekvivalentnog efekta visokih brzina protjecanja fluida u frakturi $D_f$ .....	46
Slika 16. Model pritjecanja plina iz tanko proslojenog ležišta u bušotinu opremljenu tehnikom FP. ....	50
Slika 17. Originalni shematski prikaz modela frakture u višezonalnom ležištu s hidrostatskim tlakom u frakturi, preuzeto od Liu & Valko (2018).....	55
Slika 18. Model hidrauličke pukotine eliptičnog oblika, preuzeto iz Kevrić (1999). ....	56
Slika 19. Tipska dvostruka proizvodna oprema bušotina na lokalitetu Sjeverni Jadran, preuzeto iz INA (2014). ....	62
Slika 20. Dijagram visina frakture u zavisnosti o tlaku na razini perforacija, preuzeto iz Yang et al. (2012). ....	64
Slika 21. Graf visina frakture u zavisnosti o efektivnom tlaku, preuzeto iz Yang et al. (2012). ....	65
Slika 22. Graf zavisnosti optimalnih poluduljina frakture i bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti, preuzeto iz Yang et al. (2012). ....	66
Slika 23. Dijagram toka određivanja proizvodnog potencijala bušotina u hidraulički frakturiranim tanko proslojenim ležištima plina .....	67
Slika 24. Dijagram ravnotežnih odnosa geometrije frakture u funkciji veličine protoka prethodnice. ....	72
Slika 25. Dijagram ravnotežnih odnosa maksimalno ostvarenih poluduljina frakture, efektivnog tlaka i volumena prethodnice u funkciji veličine protoka prethodnice. ....	73
Slika 26. Zavisnost kretanja vrijednosti maksimalnih poluduljina frakture i odnosnih teoretski maksimalnih bezdimenzijskih indeksa proizvodnosti u funkciji protoka prethodnice. ....	75
Slika 27. Grafički prikaz faznog procesa kreiranja optimalne širine frakture. ....	76
Slika 28. Zonacija ležišta PLQ-F i PLQ-G i odnosni profil distribucija efektivnog poroziteta, zasićenja vodom i propusnosti u bušotini SJ – 1 Dir, preuzeto iz INA-e (2014).....	79

Slika 29. Kompozitni dijagram rezultata petrofizikalne analize na bušotini SJ – 1 Dir, preuzeto iz INA-ENI (2013). .....	80
Slika 30. Indikatorska krivulja idealno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir i pravac linearne regresije ovisnosti ukupnog <i>skina</i> uslijed frakturiranja o veličini protoka plina. ....	97
Slika 31. Indikatorske krivulje i efektivna propusnost teoretski optimalne frakture ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.....	102
Slika 32. Komparativni prikaz idealne <i>IPR</i> krivulje i <i>IPR</i> krivulje određene teoretski optimalnom geometrijom frakture kod $p_{wf} = 99,70$ bar istražne bušotine SJ – 1 Dir. ....	104
Slika 33. Kompozitni dijagram rezultata petrofizikalne <i>TLA</i> analize (e-tlac®) šire zone ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir, preuzeto iz INA-ENI (2014).....	108
Slika 34. Proizvodni historijat ležišta PLQ-F u bušotini SJ - 2 Dir (INA 2020). ....	109
Slika 35. Indikatorska krivulja i ukupni <i>skin</i> efekt frakturiranog tanko proslojenog ležišta PLQ-F u bušotini SJ – 2 Dir temeljeni na hidrodinamskim mjerenjima iz ožujka 2015. ....	112
Slika 36. Mehanička svojstva ležišta temeljena na originalnoj zonaciji i simulaciji ponašanja efektivnog tlaka tijekom frakturiranja u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.....	114
Slika 37. Dijagram simulacije frakturiranja području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir temeljenoj na originalnoj zonaciji. ....	115
Slika 38. Simulirana geometrija i provodljivost frakture u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir temeljena na originalnoj zonaciji. ....	116
Slika 39. Dijagram simulacije frakturiranja u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir temeljenoj na <i>TLA</i> analizi.....	118
Slika 40. Mehanička svojstva ležišta temeljena na <i>TLA</i> analizi i simulaciji ponašanja tlaka tijekom frakturiranja u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	119
Slika 41. Simulirana geometrija i provodljivost frakture u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir temeljena na <i>TLA</i> analizi.....	120
Slika 42. Dijagram razlike mjerenog i simuliranog tlaka te razlike efektivnog tlaka na razini perforacija u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	121

Slika 43. Dijagram postotne razlike mjenenog i simuliranog tlaka te postotne razlike efektivnog tlaka na razini perforacija u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.....	121
Slika 44. Dijagram ravnotežnih odnosa maksimalno ostvarenih poluduljina frakture, efektivnog tlaka i volumena prethodnice u funkciji veličine protoka prethodnice za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.....	123
Slika 45. Zavisnost kretanja vrijednosti maksimalnih poluduljina frakture i odnosnih teoretski maksimalnih bezdimenzijskih indeksa proizvodnosti u funkciji protoka prethodnice za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	126
Slika 46. Zavisnost kretanja vrijednosti maksimalnih poluduljina frakture i vrijednosti srednje širine iz simulacije utiskivanja prethodnice i teoretski optimalne širine frakture ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	126
Slika 47. Grafički prikaz programa izvođenja optimalne frakture i simulacija ponašanja tlaka na površini i efektivnog tlaka na razini perforacija za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ...	128
Slika 48. Profil širine i provodljivosti optimalno dizajnirane frakture u funkciji poluduljine (visina/dubina i poluduljina frakture u omjeru 1:1) za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir....	128
Slika 49. Dijagram rasta visina i širina u funkciji ostvarene poluduljine frakture za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir. ....	129
Slika 50. Profil srednje provodljivosti optimalno dizajnirane frakture u funkciji poluduljine frakture za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.....	130
Slika 51. Indikatorska krivulja optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir i pravac linearne regresije ovisnosti ukupnog <i>skina</i> uslijed frakturiranja o veličini protoka plina. ....	131
Slika 52. Indikatorske krivulje i ukupni <i>skin</i> faktori frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ-2. ....	137
Slika 53. Mehanička svojstva u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir temeljena na TLA analizi. ....	139
Slika 54. Dijagram ravnotežnih odnosa maksimalno ostvarenih poluduljina frakture, efektivnog tlaka i volumena prethodnice u funkciji veličine protoka prethodnice za ležište PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir.....	140

Slika 55. Zavisnost kretanja vrijednosti maksimalnih poluduljina frakture i odnosnih teoretski maksimalnih bezdimenzijskih indeksa proizvodnosti u funkciji protoka prethodnice za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.....	144
Slika 56. Maksimalne poluduljine frakture, vrijednosti srednje širine iz simulacije utiskivanja prethodnice i teoretski optimalne širine frakture iz <i>UFD</i> proračuna za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir. ....	144
Slika 57. Grafički prikaz programa izvođenja optimalne frakture i simulacija ponašanja tlaka na površini i efektivnog tlaka na razini perforacija za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.....	145
Slika 58. Profil širine i provodljivosti optimalno dizajnirane frakture u funkciji poluduljine za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir. ....	147
Slika 59. Dijagram rasta visina i širina u funkciji ostvarene poluduljine frakture za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.....	147
Slika 60. Profil srednje provodljivosti optimalno dizajnirane frakture u funkciji poluduljine frakture za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir. ....	148
Slika 61. Indikatorska krivulja optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir i pravac linearne regresije ovisnosti ukupnog <i>skina</i> uslijed frakturiranja o veličini protoka plina. ....	149
Slika 62. Indikatorske krivulje i ukupni <i>skin</i> faktori frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir. ....	154
Slika 63. Ponašanje funkcije $p/(\mu_g Z)$ ili $1/(\mu_g B_g)$ u zavisnosti o tlaku $p$ . ....	168
Slika 64. Model promjene propusnosti u pribušotinskoj zoni.....	173
Slika 65. Shematski prikaz perforacijskog tunela ispunjenog pijeskom i anularnog sustava pješčanog zasipa s koncentrično smještenim filtrom u području perforiranog intervala. ....	177
Slika 66. Dijagram ravnotežnih odnosa geometrije frakture u funkciji veličine protoka prethodnice ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.....	213
Slika 67. Dijagram ravnotežnih odnosa geometrije frakture u funkciji veličine protoka prethodnice ležišta PLQ-F bušotine SJ - Dir.....	239

## 1. UVOD

Tanko proslojena ležišta opisuju se kao ležišta čija se varijacija u litologiji i odnosnim petrofizikalnim karakteristikama ne može odrediti pomoću karotažnih sondi konvencionalnih razlučivosti. S pozicije procjene proizvodnosti mogu se definirati kao naizmjenični niz propusnih i nepropusnih proslojaka. Rezultat analize karotažnih mjerenja petrofizikalni je prikaz/zonacija ležišta koja između ostalog uključuje procjenu litologije proslojaka, debljinu, šupljikavost, zasićenje fluidima te propusnost proslojaka. Temelj procjene efektivne propusnosti sastoji se u kombiniranju mjerenih/interpretiranih podataka tako da se zonacija određuje iz karotažnih mjerenja *TLA* analizom (engl. *Thin Layer Analysis*) i/ili iz jezgara, ako su dostupne. Proračun distribucije propusnosti zasniva se na NMR (engl. *Nuclear Magnetic Resonance*) karotažnim mjerenjima uz pomoću obrazaca različitih autora. Najpoznatiji i najčešće u uporabi jest obrazac Coates–Timura (Coates et al., 1973) koji je korišten u ovom istraživanju.

Težište istraživanja u ovom radu stavljeno je na procjenu proizvodnog potencijala frakturiranih tanko proslojenih ležišta plina na lokalitetu Sjeverni Jadran. Karakteristika tanko proslojenih ležišta ovog lokaliteta su relativno velike debljine, u nekim slučajevima i preko 20 m, koje karakteriziraju vrlo male promjene u mehaničkim svojstvima pojedinih proslojaka. Za razliku od konvencionalnih ležišta gdje postoji relativno jasna granica u gradijentu loma pokrovnih i podinskih naslaga i samog ležišta, kod tanko proslojenih ležišta takva granica ne postoji. Zbog toga je razumijevanje procesa hidrauličkog frakturiranja, odnosno geometrije stvorene frakture u svim smjerovima (njene duljine, širine i posebice visine), od presudne važnosti za procjenu proizvodnog potencijala. Fokus istraživanja stavljen je na karakterizaciji mehaničkih svojstava stijena, efektivnog koeficijenta filtracije radnog fluida i profila distribucije propusnosti. Karakterizacija je provedena temeljem karotažnih mjerenja i analiza, analiza dosad izvedenih hidrauličkih frakturiranja na istim ili sličnim facijesima, proizvodnog historijata i rezultata analize hidrodinamskih mjerenja. Nakon toga određen je maksimalni proizvodni potencijal ležišta u predmetnim bušotinama i odnosni program frakturiranja.

Od danas raspoloživih opcija opremanja ležišta/bušotina, u području tanko proslojenih ležišta gotovo redovito se koristi tehnika proizvodnog opremanja koja kombinira tehnologiju hidrauličkog frakturiranja ležišta i konvencionalnog pješčanog zasipa. Za ovu se tehniku u svjetskoj praksi uvriježilo naziv *Frac-and-Pack* ili samo *Frac Pack* (FP). Prva ga je upotrijebila



tvrtka Shell 1950. godine u Njemačkoj gdje je nakon konvencionalnog hidrauličkog frakturiranja u bušotinama ugrađen pješčani zasip (Ellis 1998). Na venecuelskim naftnim poljima je 1963. godine izvedena serija frakturiranja gdje je kao radni fluid korištena viskozna nafta (Roodhart et al., 1994). Kanali bušotina nakon toga nisu ispirani već su filtri pješčanog zasipa uranjani u zaostali podupirač. Unatoč činjenici da su te operacije bile uspješne, tek nakon 1985. godine značajnije je porastao njihov udio u odnosu na konvencionalne tehnike opremanja bušotina (Bale et al., 1994, Hannah et al., 1994). Suvremene tehnike podrazumijevaju izvođenje hidrauličkog frakturiranja i pješčanog zasipa u jednom koraku s proizvodnom opremom (filtrima) instaliranim u bušotini. U odnosu na operacije koje se izvode u dva stupnja, ove tehnike omogućuju znatno smanjenje troškova i poboljšavaju proizvodnost bušotina (Hannah et al., 1994).

Valko & Economides (1998) uveli su model određivanja optimalne geometrije frakture u svrhu maksimiziranja indeksa proizvodnosti pri poluustaljenom stanju protjecanja u realističnom kvadratnom drenažnom volumenu. Model je kasnije (Economides et al., 2002) dodatno razrađen i nazvan UFD (engl. *Unified Fracture Design*) model. Temelji se na postulatu da za neko ležište poznate propusnosti i dimenzija (volumena, drenažnog područja) i poznate mase utisnutog podupirača u efektivno propusni dio ležišta, postoji jedinstvena optimalna geometrija frakture koja određuje isto tako jedinstvenu optimalnu bezdimenzijsku vodljivost frakture, odnosno za tu masu podupirača maksimalno mogući indeks proizvodnosti. UFD model uvažava i utjecaj oštećenja frakture i ležišta te utjecaj velikih brzina protjecanja fluida kroz relevantne *skin* faktore. *Skin* uslijed oštećenja lica frakture opisali su Cinco-Ley et al. (1977). Budući da ovaj model ne uvažava doprinos radijalnog oštećenja pribušotinske zone koji gotovo uvijek u određenom stupnju postoji, Mathur et al. (1995) proširili su originalni izraz uvođenjem ekvivalentne propusnosti. Smanjenje vodljivosti frakture u pribušotinskoj zoni koja može biti posljedica bilo suženja, bilo promjena propusnosti podupirača, matematički su obradili Romero et al. (2002). Dodatni gubitak tlaka koji nastaje kao posljedica velikih brzina protjecanja plina, odnosno učestalih ubrzanja i smanjenja brzina te mijenjanja smjera molekula plina opisan je u jednadžbi Forchheimera (1901). Ovo dodatno oštećenje u *UFD* modelu je kvantificirano kroz izraz za efektivnu propusnost frakture, a temelji se na veličini Reynoldsova broja u poroznoj sredini (Hurst, 1953) i faktoru turbulencije. Opći izraz za proračun faktora turbulencije koji objedinjuje praktički sve korelacije relevantnih autora dali su Lopez-Hernandez et al. (2004). Kako bi kvantificirali oštećenja koja uzrokuju promjene propusnosti u frakturi zbog čepljenja međuprostora podupirača ležišnim materijalom, eventualno

razmrvljenim podupiračem i/ili ostacima neraspadnutog gela, Flowers et al. (2003) su predložili tzv. princip preostale propusnosti. Često je korišten i model Penny & Jina (1995) gdje su autori predložili obrazac kojim se efekt oštećenja uzrokovan ostacima gela izražava kroz tzv. modificirani faktor turbulencije. Spomenuti obrasci temelj su određivanja proizvodnog potencijala ležišta te su korišteni tijekom istraživanja.

Konvencionalni pristup prema *UFD* proceduri pretpostavlja dvodimenzionalnu (2D) geometriju frakture. Ovdje je visina frakture konstantna i unaprijed određena, a rezultat proračuna je, za neku masu utisnutog podupirača, optimalna bezdimenzijska provodljivost frakture temeljem koje se određuje optimalna poluduljina i optimalna širina frakture.

Pitakbunkate et al. (2011) uveli su iterativni postupak gdje je za višeslojna ležišta visina frakture stavljena u funkcionalnu zavisnost efektivnog tlaka frakture. Procedura se sastoji u formiranju dviju krivulja visina frakture. Jedna je temeljena na principima linearno elastične mehanike frakture (LEMF), tzv. „krivulja ravnotežnih visina frakture“ (engl. „*Equilibrium Height Curve*“). Formiranje druge krivulje zasniva se na principima iz *UFD* postupka i 2D PKN (Perkins-Kern-Nordgen, 1961) modela hidrauličkog frakturiranja. Presjecište ovih krivulja daje rješenje sustava, odnosno ravnotežnu visinu frakture i odgovarajući efektivni tlak, te za tu visinu optimalnu poluduljinu i hidrauličku širinu frakture.

Yang et al. (2012) proširili su originalni postupak Pitakbunkate et al. (2011). U prvi plan su stavili izračun optimalne poluduljine i odnosne širine frakture, pri različitim kombinacijama ravnotežnih odnosa visina pukotine. Temeljem izračunatih optimalnih poluduljina fraktura i ekvivalentnih širina, računa se bezdimenzijska provodljivost frakture iz koje se opet dobiva bezdimenzijski indeks proizvodnosti. Iz generiranog grafa zavisnosti optimalnih poluduljina frakture i bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti, za različite visine, određuje se globalni maksimum kojim je identificiran maksimalno mogući indeks proizvodnosti. Ovaj postupak autori su okarakterizirali kao pseudo-3D model gdje se nezavisno određuju visina te maksimalna poluduljina i širina frakture.

Zbog velikog broja proslojaka koji karakteriziraju tanko proslojena ležišta, kompleksnosti i preciznosti proračuna geometrije frakture, osnovna ideja Yanga et al. (2012) proširena je uvođenjem trodimenzionalnih numeričkih simulacija hidrauličkog frakturiranja. Problem kojeg su za višezonalna ležišta postavili Yang et al. (2012) je redefiniran te je razvijena nova metoda koja funkcionalno povezuje proces trodimenzionalnih numeričkih simulacija hidrauličkog frakturiranja i zahtjev za maksimalno mogućim indeksom proizvodnosti iz 2D *UFD* postupka.

Cilj primjene ove metode je optimalni program hidrauličkog frakturiranja koji će rezultirati optimalnom poluduljinom i optimalnom širinom u granicama dozvoljene visine frakture, dakle u trodimenzionalnom prostoru. Samim time ostvarena je optimalna bezdimenzijska provodljivost frakture i maksimalni bezdimenzijski indeks proizvodnosti jednak ili gotovo jednak onom iz konvencionalnog *UFD* postupka. Rezultirajuća geometrija frakture pri tome uvažava i negativne efekte mogućih linearnih oštećenja frakture kao i one uzrokovane turbulencijom plina ako postoje. Uvođenjem ove metode postalo je moguće preciznije valorizirati stvarni proizvodni potencijal tanko proslojenih ležišta.

Hipoteza doktorskog rada da je osnovom procjene distribucije geomehaničkih svojstava, efektivnog koeficijenta filtracije radnog fluida i propusnosti tanko proslojenih ležišta u kombinaciji s procjenom veličine smanjenja proizvodnosti bušotine kao posljedice tehnike proizvodnog opremanja ležišta/bušotine moguće s relativno visokom razinom sigurnosti, odrediti njihov proizvodni potencijal potvrđena je istraživanjima na tanko proslojenom ležištu PLQ-F u bušotinama SJ – 1 Dir i SJ – 2 Dir. Imena predmetnih bušotina su imaginarna, dok su svi podaci korišteni u istraživanjima dobiveni na osnovu stvarnih mjerenja i analiza.

Provedenim istraživanjem pokazano je kako je primjenom nove metode moguće odrediti takav program frakturiranja ležišta koji će rezultirati geometrijom frakture koja se zanemarivo razlikuje od one idealne, uvjetovane *UFD* postupkom. Pri tom je injektiranjem odgovarajuće granulacije podupirača u ležište i prstenasti prostor između proizvodne kolone i filtra pješčanog zasipa ostvarena funkcija kontrole ležišnog materijala. Pokazano je da se efekt instalacije anularnog pješčanog zasipa na ukupni gubitak tlaka može smatrati zanemarivim.

Znanstveni doprinos ovog rada očituje se u razvoju jedinstvene metode odabira optimalnog načina frakturiranja i proizvodnog opremanja ležišta u svrhu postizanja maksimalno mogućih indeksa proizvodnosti. Prikazana metoda može se univerzalno primijeniti na tanko proslojenim ležištima različitih kompleksnosti bilo kojeg lokaliteta.

## **2. TANKO PROSLOJENA LEŽIŠTA – POJAM I PROCJENA DISTRIBUCIJE EFEKTIVNIH PROPUSNOSTI**

U ovom poglavlju objašnjen je pojam tanko proslojenih ležišta, ukratko su prikazane metode za određivanje distribucije efektive propusnosti te je pojašnjena metodologija procjene efektivnih propusnosti koja je korištena tijekom istraživanja.

### **2.1. Što su to tanko proslojena ležišta?**

Tanko proslojena ležišta (engl. *thin layers* ili *thin beds*) najčešće se opisuje kao ležišta čija se varijacija u litologiji i odnosnim petrofizikalnim karakteristikama ne može odrediti pomoću karotažnih sondi konvencionalnih razlučivosti. U naftnoj industriji pojam tanko proslojenih ležišta nije jednoznačno određen već njegova definicija zavisi o disciplini unutar koje se govori o njemu. Slika 1. zorno prikazuje taj odnos. Na razini vertikalne rezolucije seizmičkih ispitivanja pod pojmom tankih slojeva podrazumijevaju se svi slojevi tanji od 10 m. Za razinu vertikalne rezolucije konvencionalnih karotažnih mjerenja to su svi slojevi tanji od 30 cm (1 stopa), dok na razini laboratorijskih ispitivanja jezgara praktički nema ograničenja debljine proslojaka. Dakle, odgovor na pitanje što su to tanko proslojena ležišta zavisi od discipline koju se pita, odnosno o vertikalnoj rezoluciji metode koja se upotrebljava za procjenu takvog facijesa. U našoj praksi, a i u ovome radu, govorimo o karotažnoj rezoluciji, tj. da su tanki slojevi svi slojevi tanji od 30 cm. Slijedom navedenog, tanko proslojena ležišta se s pozicije procjene proizvodnosti mogu definirati kao naizmjenični niz propusnih i nepropusnih zona tanjih od 30 cm.

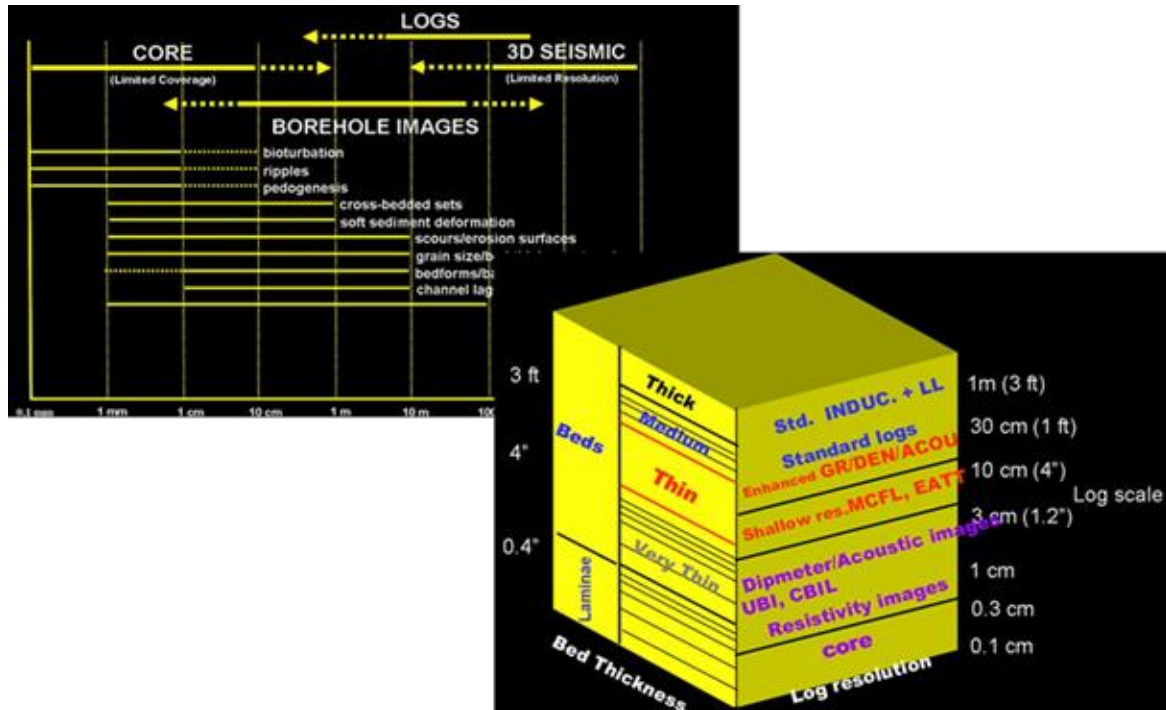
### **2.2. Određivanje distribucije propusnosti**

Točna procjena raspodjele propusnosti tanko proslojenih ležišta temeljni je parametar koji određuje kvalitetu procjene njihova proizvodnog potencijala. Osnovne metode koje se za procjenu propusnosti ležišta ugljikovodika danas koriste su:

- mjerenja propusnosti na jezgrama u laboratorijskim uvjetima;
- procjena propusnosti pomoću karotažnih mjerenja u otvorenom kanalu bušotine;
- hidrodinamska mjerenja na bušotinama.

Različite metode mogu dati vrlo značajna odstupanja što uglavnom zavisi o radijusu obuhvata (istraživanja) koja pojedina metoda omogućuje te obrascima po kojima se propusnost

iz tih mjerenja interpretira. Slika 2. prikazuje radijus obuhvata pojedinih metoda za procjenu propusnosti ležišta.

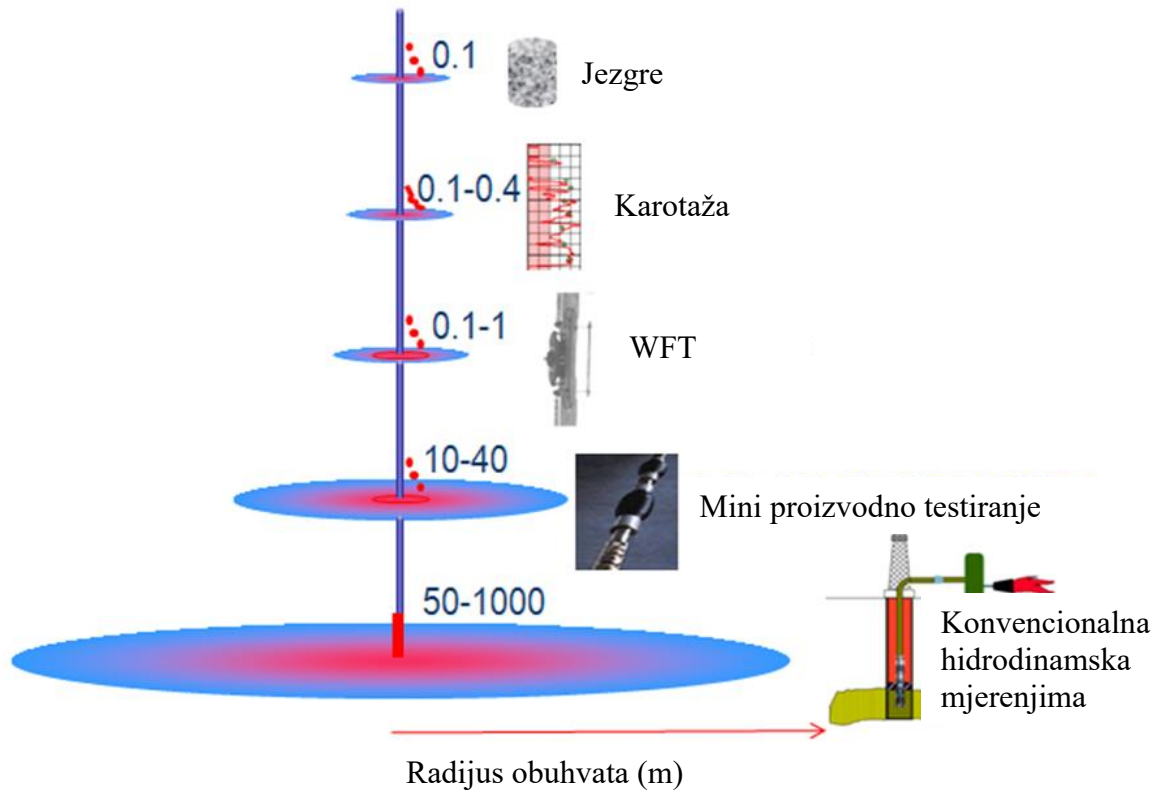


Slika 1. Grafički prikaz definicije pojma tanko proslojenih ležišta (engl. *thin layers* ili *thin beds*), preuzeto od Baker Atlasa.

Metode koje se danas koriste pri procjeni proslojenosti – zonaciji, distribuciji propusnosti i zasićenja na tanko proslojenim ležištima temelje se na komparativnoj analizi izravnih mjerenja na jezgrama (do kojih je često zbog nekonsolidiranosti nemoguće doći), karotažnih mjerenja visoke razlučivosti u otvorenom kanalu bušotine i konvencionalnih hidrodinamskih mjerenja (koja obično uključuju test uz više uvjeta protoka i test porasta tlaka). Tamo gdje nije moguće provesti konvencionalna hidrodinamska ispitivanja iz različitih razloga, u uporabi su suvremeni modularni *WFT* (engl. *Wireline Formation Testing*) sustavi nošeni na kablu ili bušaćim šipkama. Alternativno se koriste sustavi za tzv. mini proizvodno testiranje, kojima je u ovom trenutku moguće provesti testiranje u otvorenom kanalu bušotine intervala do 1 m visine. Ovakva testiranja bušotina nazivaju se i mini *DST* ili *IPTT* (engl. *Interval Pressure Transient Testing*) i valjana su alternativa konvencionalnim hidrodinamskim mjerenjima (Cantini et al., 2013).

Temelj procjene efektivne propusnosti na tanko proslojenim ležištima sastoji se u kombiniranju mjerenih / interpretiranih podataka, tako da se zonacija određuje iz karotažnih

mjerenja tzv. *TLA* analizom (engl. *Thin Layer Analysis*) i/ili iz jezgara, ako su dostupne. Raspodjela efektivnih propusnosti po pojedinim prosljocima određuje uz pomoć koeficijenta korekcije propusnosti  $\xi_{NMR}$  (engl. *Permeability Scale Factor*).



Slika 2. Radijus obuhvata pojedinih metoda za procjenu propusnosti ležišta, preuzeto od Cantini et al. (2013).

U ovom radu korišteni su podaci o zonaciji ležišta koja je napravljena e-tlac<sup>®</sup> (zaštićeni naziv firme ENI) analizom. Procjena formacije po toj metodi provodi se kroz sljedećih pet koraka:

- zonacija facijesa (tijela istih petrofizikalnih svojstava) po sustavu pješčenjak/lapor (propusno/nepropusno) temeljem FMI (engl. *Full Bore Microimager*) karotažnog mjerenja. Deklarirana vertikalna rezolucija ove sonde u ovom trenutku iznosi 25,4 mm (1");
- modeliranje otpornih vrijednosti pješčenjaka u tankim slojevima kalibriranjem karakterističnih varijabli matematičkih modela koji simuliraju vrijednost izmjerenih otpora stijene. Često se ovaj postupak zove i „preklapanje krivulja izmjerenog i modeliranog otpora“;

- izračun volumena glina temeljem *MMDD - ADT* (engl. *Multifrequency Measurement of Dielectric Dispersion*) karotažnih mjerenja. Ovim se mjerenjem određuje vrijednost saliniteta fluida u formaciji, osnovom kojih se, pomoću primjerenih matematičkih modela određuje volumen glina;
- izračun efektivnog poroziteta korekcijom ukupnog poroziteta za volumen gline;
- izračun distribucije zasićenja vodom temeljem matematičkih modela, ovdje je korištena „Indonesia“ jednadžba.

Proračun distribucije propusnosti na tanko proslojenim ležištima zasniva se na *NMR* (engl. *Nuclear Magnetic Resonance*) karotažnim mjerenjima. Ovom karotažnom metodom procjenjuje se distribucija poroziteta te volumena i zasićenja pornog prostora fluidima. Propusnost se računa pomoću obrazaca različitih autora temeljem vrijednosti zasićenja. Najpoznatiji i najčešće u uporabi je obrazac Coates – Timura (Coats et al., 1973), koji je korišten i u ovom radu:

$$k_{NMR,i} = \left( \frac{\Phi_{total,i}}{c} \right)^a \left( \frac{\Phi_{free,i}}{\Phi_{bound,i}} \right)^b \quad (2.1)$$

Propusnost izračunata iz *NMR-a* može se kalibrirati s propusnošću mjerenu u laboratorijskim uvjetima na jezgri istog ležišta-intervalu preko koeficijenata a, b i c. Kada ne postoje mjerenja na jezgrama može se uzeti da je a=2, b=4 dok vrijednost c zavisi o tipu stijene (Cantini et al., 2013). Vertikalna rezolucija *NMR* sonde u ovom trenutku je 303 mm (1 stopa) i po razlučivosti zaostaje za rezolucijom sonde temeljem kojih je napravljena zonacija ležišta. No, u ovom trenutku to je najbolje što postoji i unatoč tome, generalno daje dobar uvid kretanja distribucije propusnosti  $k_{NMR,i}$  koja je osnova za izračun koeficijenta korekcije propusnosti  $\xi_{NMR}$ .

Koeficijent korekcije propusnosti temeljen je na pretpostavci linearnog odnosa aktualne moćnosti ležišta  $(k_g h_{ef})_{WT}$  u njegovom raskrivenom dijelu  $h_{WT}$  dobivenom iz hidrodinamskih mjerenja (i/ili miniDST mjerenja) i moćnosti ležišta  $\sum_{i=1}^n (k_{NMR,i} h_i)_{WT}$  na istom intervalu  $h_{WT}$  procijenjenih iz *NMR* karotažnih mjerenja prema slijedećem obrascu:

$$\xi_{NMR} = \frac{(k_g h_{ef})_{WT}}{\sum_{i=1}^n (k_{NMR,i} h_i)_{WT}} = konst. \quad (2.2)$$

Moćnost ležišta  $(k_g h_{ef})_{WT}$  dobivena je interpretacijom testa porasta tlaka na raskrivenom dijelu ležišta  $h_{WT}$ . Budući da je kod tanko proslojenih ležišta temeljna pretpostavka izmjena propusnih i nepropusnih zona, odnosno vertikalna propusnost nepropusnih proslojka jednaka je nuli, moguć utjecaj neraskrivenog dijela ležišta je zanemariv i može se smatrati da ne sudjeluje u proizvodnji. Ova pretpostavka sasvim je logična budući da iz same definicije tanko proslojenih ležišta proizlazi da najviše 30 cm eventualno propusnih proslojaka iznad ili ispod raskrivenog intervala  $h_{WT}$  eventualno sudjeluje u proizvodnji.

Ukoliko se postavi teza da je obrazac (2.1) valjan, i da je:

$$(h_{ef})_{WT} = \sum_{i=1}^n (h_i)_{WT}, \quad (2.3)$$

tada se može reći da je i odnos propusnosti raskrivenog intervala  $h_{WT}$  procijenjenih *NMR* mjerenjima i efektivnih za plin dobivenih hidrodinamskim mjerenjima linearno proporcionalan. Iz toga proizlazi da će primjenom metode analogije efektivna propusnost za plin svakog pojedinog proslojka po visini cjelokupnog ležišta imati vrijednost:

$$k_{g,i} = \xi_{NMR} k_{NMR,i}. \quad (2.4)$$

Tada je primjenom standardnih obrazaca koji opisuju područje protjecanja fluida iz ležišta u bušotinu moguće procijeniti indeks proizvodnosti za cjelokupno ležište uvažavajući različite opcije geometrija raskrivanja ležišta (vertikalna, kosa ili horizontalna bušotina) te proizvodnog opremanja bušotina (otvoreni kanal bušotine, *Frac Pack*, ekspandirajući filteri, itd.). Štoviše, pod pretpostavkom da je za facijese sličnog karotažnog odraza, znači sličnih debljina pješćanih tijela, sličnih udjela glina i efektivnih poroziteta, gdje su koeficijenti a, b i c Timur - Coatesove jednadžbe identični, metodom analogije je moguće primijeniti vrijednost istog koeficijenta korekcije propusnosti  $\xi_{NMR}$ .



### **3. TEORIJA ODREĐIVANJA PROIZVODNOG POTENCIJALA BUŠOTINA U HIDRAULIČKI FRAKTURIRANIM TANKO PROSLOJENIM LEŽIŠTIMA PLINA I PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA**

Procjena proizvodnosti bušotina u nekonsolidiranim, tanko proslojenim ležištima plina zasniva se na komparativnoj usporedbi mogućih načina njihova raskrivanja i opremanja. Već samom činjenicom da se radi o tankim izmjenama propusnih i nepropusnih proslojaka, ideja o raskrivanju horizontalnim kanalom bušotine gubi smisao zbog visoke vertikalne anizotropije. Za uključenje kompletnog ležišta u proizvodnju potrebno je ležište raskriti po punoj debljini. To može značiti geometrije bušotina od praktički izrazito kosih, dugih kanala pa do vertikalnog kanala bušotine. Tehno-ekonomske analize na lokalitetu Sjeverni Jadran pokazale su da maksimalni otkloni bušotina mogu ići do 60°. Ovakva praksa usvojena je s obzirom na rezerve koje takva ležišta sadrže, njihovu rasprostranjenost, proslojenost i raspodjelu propusnosti. Pri tome uvažavajući činjenicu da je potrebno primijeniti neku od tehnika za kontrolu ležišnog materijala sa svim svojim ograničenjima, potreban broj razradnih bušotina i broj proizvodnih platformi. Radi efikasne izolacije pojedinih ležišta i/ili zona unutar pojedinih ležišta, bušotine se u pravilu zacjevljuju te se prstenasti prostor između kolone zaštitnih cijevi i formacije cementira. Raskrivanje ležišta frakturiranjem, poglavito u zacjevljenom vertikalnom kanalu bušotine u smislu ostvarenja maksimalno mogućeg kontakta s propusnim dijelovima ležišta i njihovim međusobnim vertikalnim povezivanjem, optimalna je varijanta. Zbog toga se *FP*, kao metoda koja uspješno kombinira tehnologiju hidrauličkog frakturiranja ležišta i konvencionalnog pješčanog zasipa pokazala kao uspješna, ne samo u pogledu kvalitetne kontrole ležišnog materijala, već i zbog ostvarenih indeksa proizvodnosti. Procjena indeksa proizvodnosti nekonsolidiranih, tanko proslojenih ležišta koja su opremljena uz pomoć tehnike *FP* zasniva se na principima prikazanim u ovom poglavlju.

### 3.1. Teorija određivanja proizvodnosti bušotina u nekonsolidiranim hidraulički frakturiranim tanko proslojenim ležištima plina i pregled relevantnih istraživanja

U ovom poglavlju prikazana je teoretska osnova procjene proizvodnosti plinskih bušotina za različite geometrije raskrivanja ležišta i vrijednosti mogućih odstupanja od idealnog radijalnog modela pritjecanja plina iz ležišta u bušotinu. Poseban osvrt stavljen je na proizvodnost hidraulički frakturiranih ležišta s težištem na *UFD* optimalizacijskom postupku.

Slabo propusna ležišta zahtijevaju duge, tanke frakture, dok srednje i visoko propusna ležišta kratke i široke frakture. U vrlo širokom rasponu mogućnosti između ova dva ekstrema, oduvijek je bio problem odrediti pravu kombinaciju duljine i širine frakture u nekom ležištu (Economides i Martin, 2007). Ovaj problem riješili su Economides et al. (2002) uvođenjem koncepta bezdimenzijskog broja podupirača i *UFD* optimizacijskog postupka. *UFD* postupak bazira se na teoriji da za neki određeni omjer između propusnosti frakturiranog ležišta i propusnosti podupirača unutar frakture postoji jedinstveni odnos između poluduljine i širine pukotine, koji će dati maksimalno mogući indeks proizvodnosti.

#### 3.1.1. Jednadžba difuzije realnog plina u poroznoj sredini

Fizikalni opis protjecanja fluida u poroznoj sredini temelji se na zakonu očuvanja mase ili jednadžbi kontinuiteta:

$$\frac{\partial(\phi\rho)}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{u}) = q, \quad (3.1)$$

Darcyevom zakonu, koji za homogenu, izotropnu sredinu ima diferencijalni oblik:

$$\vec{u} = -\frac{\bar{k}}{\mu}(\nabla p - \rho\vec{g}), \quad (3.2)$$

i jednadžbi stanja fluida. Pod jednadžbom stanja podrazumijeva se veza između gustoće  $\rho$ , tlaka  $p$  i temperature  $T$ . Budući da se protjecanje fluida u ležištima nafte i plina općenito smatra izotermnim procesom, jednadžbom stanja računata volumne promjene funkcija su samo tlaka. Ako je fluid realni plin, jednadžba stanja tada ima oblik:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{ZRT}, \quad (3.3)$$

a izraz za stlačivost plina glasi:

$$c_g = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} = \frac{Z}{p} \frac{\partial}{\partial p} \left( \frac{p}{Z} \right) = \frac{1}{p} - \frac{1}{Z} \frac{dZ}{dp}. \quad (3.4)$$

Specijalni slučaj je izraz za idealni plin ( $Z = 1$ ) kada vrijedi:

$$c_g = \frac{1}{p} \quad (3.5)$$

Kombiniranjem ovih zakona, pod pretpostavkom da je gravitacijska komponenta u jednadžbi (3.2) zanemariva, izvedena je opća jednadžba difuzije ili jednadžba provođenja kojom se opisuje protjecanje realnog plina u poroznoj sredini (Heinemann, 2005):

$$\nabla \left( \bar{k} \frac{pM}{ZRT} \nabla p \right) = \phi \mu c_g \frac{2p}{\mu Z} \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (3.6)$$

Al-Hussainy at al. (1966) definirali su tzv. funkciju pseudotlaka:

$$m(p) = 2 \int_{p_0}^p \left( \frac{p}{\mu Z} \right) dp, \quad (3.7)$$

gdje je  $p_0$  neki referentni tlak, najčešće jednak standardnom tlaku ili u nekim slučajevima nuli.

Uvođenjem funkcije pseudotlaka omogućene su slijedeće derivacije (Heinemann, 2005):

$$\nabla m(p) = \frac{dm(p)}{dp} \nabla p = \frac{2p}{\mu Z} \nabla p, \quad (3.8)$$

i,

$$\frac{\partial m(p)}{\partial t} = \frac{dm(p)}{dp} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{2p}{\mu Z} \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (3.9)$$

Uvrštenjem jednadžbi (3.8) i (3.9) u jednadžbu (3.6) i njenim sređivanjem dobije se opća jednadžba difuzije za realni plin (Heinemann, 2005):

$$\nabla \left[ \bar{k} \nabla m(p) \right] = \phi \mu c_g \frac{2p}{\mu Z} \frac{\partial m(p)}{\partial t}. \quad (3.10)$$

Uz pretpostavku da je porozna sredina homogena i izotropna, odnosno da je po cjelokupnom volumenu karakterizirana propusnost  $k$  i šupljikavost  $\phi$  koje su jednake u svim smjerovima prostora, jednadžba difuzije za trodimenzionalni linearni izotermi protok realnog plin poprima oblik:

$$\nabla^2 m(p) = \frac{\phi \mu c_g}{k} \frac{\partial m(p)}{\partial t}, \quad (3.11)$$

gdje su:

$\phi$  - šupljikavost stijene, dio jedinice;

$\rho$  - gustoća fluida,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\bar{u}$  - brzina filtracije fluida,  $\text{m}/\text{s}$ ;

$t$  - vrijeme,  $s$ ;

$p$  - tlak, Pa;

$\mu$  - viskoznost fluida, Pa s ;

$k$  - propusnost ležišta,  $\text{m}^2$ ;

$m(p)$  - funkcija pseudotlaka,  $\text{Pa}^2/\text{Pa s}$ ;

$M$  - molarna masa,  $\text{kg}/\text{mol}$ ;

$c_g$  - stlačivost plina,  $\text{Pa}^{-1}$ ;

$R$  - opća plinska konstanta,  $8,3145 \text{ J}/\text{K mol}$ ;

Budući da se ležišta nafte i plina mogu smatrati u određenoj mjeri elastičnim poroznim tijelima, vrijednost stlačivosti plina  $c_g$  u jednadžbi (3.11) se zamjenjuje vrijednošću ukupnog stlačivosti sustava  $c_t$ :

$$c_t = S_o c_o + S_w c_w + S_g c_g + c_f. \quad (3.12)$$

U radijalnom koordinatnom sustavu koji pretpostavlja bušotinu smještenu u središtu poroznog tijela/ležišta, jednadžba difuzije za realni plina ima oblik:

$$\frac{\partial^2 m(p)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial m(p)}{\partial r} = \frac{\phi \mu c_t}{k} \frac{\partial m(p)}{\partial t}. \quad (3.13)$$

Idealni plin karakterizira vrijednost faktora odstupanja  $Z = 1$  te stlačivost plina koji je obrnuto proporcionalan tlaku  $c_g = \bar{p}^{-1}$ . Tu je  $\bar{p}$  srednji tlak razmatranog volumena ležišta u

određenom vremenskom intervalu (Heinemann, 2005). Funkcija pseudotlaka  $m(p)$  tada poprima vrijednost:

$$m(p) = \frac{p^2}{\mu}. \quad (3.14)$$

U radijalnom koordinatnom sustavu jednadžba difuzije za idealni plin u tom slučaju ima oblik:

$$\frac{\partial^2 p^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p^2}{\partial r} = \frac{\phi \mu c_t}{k} \frac{\partial p^2}{\partial t}. \quad (3.15)$$

Ova jednadžba izgleda gotovo identična jednadžbi difuzije za fluid konstantne stlačivosti, osim što se kao razumna aproksimacija umjesto tlaka  $p$  koristi  $p^2$ .

Posebno mjesto u inženjerskoj praksi, posebice u interpretaciji hidrodinamskih mjerenja zauzima tzv. bezdimenzijski oblik jednadžbe difuzije realnog plina:

$$\frac{\partial^2 m_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial m_D}{\partial r_D} = \frac{\partial m_D}{\partial t_D}. \quad (3.16)$$

Praktična vrijednost primjene bezdimenzijskih varijabli očituje se u interpretaciji hidrodinamskih mjerenja pomoću tzv. „tipskih krivulja“.

Rješenja jednadžbe difuzije (3.13) i njenog bezdimenzijskog oblika (3.16) ovise o definiciji početnih i rubnih uvjeta. Razvijene su dvije grupe rješenja, za konstantan protok i za konstantan tlak na unutarnjoj granici ležišta. Rješenja za konstantan protok standardno se primjenjuju za srednje i dobro propusna ležišta, dok su za slabo propusna ležišta prikladnija rješenja za konstantan tlak (Čikeš, 2015.). Unutar svake grupe postoje tri rješenja: za neograničena ležišta, ograničena ležišta sa zatvorenom vanjskom granicom i ograničena ležišta s konstantnim tlakom na vanjskoj granici ležišta. U ovom radu korištena su rješenja za konstantan protok, za konvencionalna, dakle srednje i dobro propusna ležišta, u kakva se ubrajaju i tanko proslojena ležišta lokaliteta Sjeverni Jadran.

Općenito, pri protoku fluida iz ležišta u bušotinu mogu se razlučiti neustaljeno stanje protjecanja (engl. *Non-Steady State Flow Condition*) i ustaljeno stanje protjecanja (engl. *Steady State Flow Condition*). Unutar režima neustaljenog stanja protjecanja dodatno se mogu razlučiti neustaljeno stanje protjecanja (engl. *Transient Flow Condition*), kasno neustaljeno stanje protjecanja (engl. *Late Transient Flow Condition*) i poluustaljeno stanje protjecanja (engl.

*Pseudo-Steady State Flow Condition*). Potrebno je naglasiti da se hipotetski u pojedinim fazama proizvodnog vijeka sva spomenuta stanja protjecanja mogu javiti na istoj bušotini.

### 3.1.2. Proizvodnost plinske bušotine kod neustaljenog stanja protjecanja

Kod srednje i dobro propusnih ležišta neustaljeno stanje protjecanja karakteristično je za rana, relativno kratka vremena od puštanja bušotine u rad. Tada tlak još nije uvjetovan utjecajem vanjske granice ležišta i ono se može u tom trenutku interpretirati kao neograničeno. Kod slabo propusnih ležišta ovaj period može trajati iznimno dugo i predstavljati vremenski dominantno stanje protjecanja.

Za neograničeno ležište početni uvjet opisuje jednoliku rasprostranjenost ležišnog tlaka, odnosno matematički gledano  $p(r, t=0) = p_i$ . Prvi rubni uvjet definira ležište kao neograničeno:  $p(r, t) \rightarrow p_i$  za  $r \rightarrow \infty$  i  $t > 0$ . Uvođenjem volumnog faktora realnog plina ( $B_g$ ):

$$B_g = \frac{ZT p_{SC}}{p T_{SC} Z_{SC}} = \frac{ZT p_{SC}}{p T_{SC}}, \quad (3.17)$$

u Darcyjev izraz za protjecanje nestlačivog fluida, drugi rubni uvjet za protok realnog plina na unutarnjoj granici ležišta, odnosno radijusu bušotine  $r_w$  poprima oblik:

$$\left. \frac{\partial m(p)}{\partial r} \right|_{r_w} = -\frac{q_{gSC} T}{\pi k_g h r_w} \frac{p_{SC}}{T_{SC}}, \quad t > 0. \quad (3.18)$$

Uvažavanjem prikazanih početnih i rubnih uvjeta, a temeljem rješenja van Everdingena i Hursta (1949) za jednofazno protjecanje nestlačivog fluida, metodom analogije, dano je rješenje jednadžbe difuzije za protjecanje realnog plina. Uvrštenjem  $r = r_w$ , odnosno  $m(p(r, t)) = m(p_{wf}(t))$  dobiva se izraz za izračun tlaka na unutrašnjoj granici ležišta, odnosno u bušotini  $p_{wf}(t)$  u bilo kojem vremenu  $t$ :

$$m(p_i) - m(p_{wf}(t)) = \frac{q_{gSC} T}{\pi k_g h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \left[ -\frac{1}{2} E_i \left( -\frac{\phi \mu_{gi} c_{ti} r_w^2}{4k_g t} \right) \right]. \quad (3.19)$$

Tu je  $-E_i(-x) = \int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$  eksponencijalni integral koji za  $x < 0,01$ , odnosno za veliko

vrijeme, može biti aproksimiran s izrazom:

$$-E_i(-x) \cong -\ln(x) - \gamma = \ln\left(\frac{1}{x}\right) - \gamma. \quad (3.20)$$

Zaokružena vrijednost Eulerove konstante na pet decimalnih mjesta iznosi  $\gamma = 0,57722$ , tako da se za  $\frac{4k_g t}{\phi \mu_{gi} c_{ii} r_w^2} > 100$  obrazac (3.19) može formulirati na slijedeći način:

$$m(p_{wf}(t)) = m(p_i) - \frac{q_{gSC} T}{\pi k_g h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{1}{2} \left[ \ln \frac{k_g t}{\phi \mu_{gi} c_{ii} r_w^2} + 0,80907 \right]. \quad (3.21)$$

Idealni radijalni model pritoka fluida iz ležišta u bušotinu u realnim je uvjetima izuzetno rijedak. Pojam *skin* faktora uveo je van Everdingen (1953) kao bezdimenzijsku veličinu koja će pokazivati veličinu odstupanja aktualnog od idealnog gubitka tlaka pri protjecanju fluida iz ležišta u bušotinu. *Skin* faktor definiran je izrazom:

$$s = \left( \frac{k}{k_d} - 1 \right) \ln \left( \frac{r_d}{r_w} \right). \quad (3.22)$$

Uvođenjem *skin* efekta, obrazac za izračun ukupnog gubitka tlaka pri protjecanju realnog plina iz ležišta u bušotinu poprima svoj poznati oblik:

$$m(p_i) - m(p_{wf}) = \frac{q_{gSC} T}{\pi k_g h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \left[ \frac{1}{2} \left( \ln \frac{k_g t}{\phi \mu_{gi} c_{ii} r_w^2} + 0,80907 \right) + s \right], \quad (3.23)$$

gdje su:

$B_g$  - volumetrijski koeficijent za plin,  $\frac{m^3}{m_{sc}^3}$  ;

$\mu_{gi}$  - početna viskoznost plina, Pa s .

$c_{gi}$  - početna stlačivost plina, Pa<sup>-1</sup> .

$k_g$  - propusnost ležišta za plin, m<sup>2</sup> ;

$k_d$  - propusnost oštećene zone, m<sup>2</sup> ;

$m(p_i)$  - početna funkcija pseudotlaka, Pa<sup>2</sup>/Pa s ;

$m(p_{wf})$  - funkcija pseudotlaka u kanalu bušotine, Pa<sup>2</sup>/Pa s ;

$q_{gsc}$  - objamski protok plina sveden na standardne uvjete,  $\text{m}^3/\text{s}$  ;

$p_{sc}$  - standardni tlak, 101325 Pa ;

$T_{sc}$  - standardna temperatura, 288,15 K ;

$h$  - debljina ležišta, m ;

$r_w$  - radijus bušotine, radijus unutarnje granice ležišta, m ;

$r_d$  - radijus oštećene zone, m ;

$Z$  - bezdimenzijski faktor odstupanja realnog plina od idealnog

Istovjetno je i rješenje bezdimenzijske jednadžbe difuzije realnog plina (3.16). Jednadžba (3.16) temelji se na bezdimenzijskim varijablama, na bezdimenzijskom pseudotlaku realnog plina  $m_D$  :

$$m_D = \frac{\pi k_g h}{q_g T} \frac{T_{sc}}{p_{sc}} \left[ m(p_i) - m(p_{wf}) \right], \quad (3.24)$$

bezdimenzijskom vremenu  $t_D$  :

$$t_D = \frac{k_g t}{\phi \mu_{gi} c_{ii} r_w^2}. \quad (3.25)$$

i bezdimenzijskom radijusu  $r_D$  :

$$r_D = \frac{r}{r_w}. \quad (3.26)$$

Uvažavajući početni uvjet koji opisuje jednoliku rasprostranjenost ležišnog tlaka, gdje je  $m_D = 0, t_D = 0, 0 \leq r_D < \infty$  i rubne uvjete, vanjski, gdje je ležište definirano kao neograničeno  $m_D \rightarrow 0, r_D \rightarrow \infty, t_D > 0$  i unutarnji, za protok realnog plina na unutarnjoj granici ležišta, odnosno radijusu bušotine  $r_w$  gdje je:

$$\left. \frac{\partial m_D}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = 1, t_D > 0, \quad (3.27)$$

opće rješenje bezdimenzijske jednadžbe difuzije realnog plina ima oblik:



$$m_D(r_D, t_D) = -\frac{1}{2} E_i \left( -\frac{r_D^2}{4t_D} \right). \quad (3.28)$$

Za  $4t_D/r_D^2 \geq 100 \Rightarrow t_D/r_D^2 \geq 25$ , te za slučaj  $r = r_w$  i  $r_D = 1$  i uključenjem *skin* efekta  $s$ , rješenje jednadžbe difuzije glasi:

$$m_D(1, t_D) = -\frac{1}{2} (\ln t_D + 0,80907) + s. \quad (3.29)$$

Uvrštenjem jednadžbi (3.24) i (3.25) u jednadžbu (3.29) i njenim sređivanjem, rješenje jednadžbe difuzije dobiva svoj poznati konačni oblik (3.23).

Praktična vrijednost primjene bezdimenzijskih varijabli očituje se u interpretaciji hidrodinamskih mjerenja pomoću tzv. „tipskih krivulja“. Naime, temeljem spoznaje da je pad tlaka u ležištu  $\Delta p = m(p_i) - m(p_{r,t})$  upravo proporcionalan nekoj konstanti i bezdimenzijskom pseudotlaku realnog plina  $m_D$ , koji je pak funkcija bezdimenzijskog vremena  $t_D$  i svojstva logaritma gdje vrijedi odnos  $\log ax = \log a + \log x$ , razvijena su grafička rješenja jednadžbe difuzije (Čikeš 2015). Preoblikovanjem jednadžbi (3.24) i (3.25) u njihovu logaritamsku inačicu, gdje su:

$$\log m_D = \log \frac{\pi k_g h}{q_g T} \frac{T_{SC}}{p_{SC}} + \log [m(p_i) - m(p_{wf})], \quad (3.30)$$

i

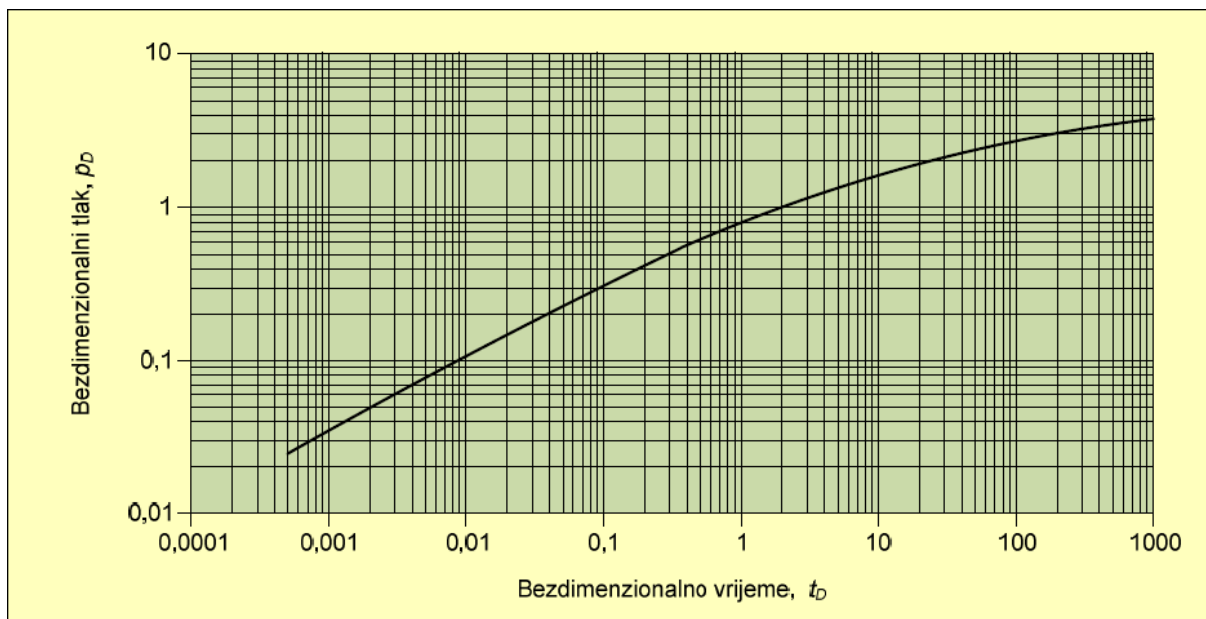
$$\log t_D = \log \frac{k_g}{\phi \mu_{gi} c_{ii} r_w^2} + \log t, \quad (3.31)$$

vidi se da je bezdimenzijska vrijednost varijabli jednaka stvarnoj, ali uz određeni pomak. Temeljem toga može se zaključiti da je krivulja  $m_D$  u funkciji  $t_D$  svojim oblikom istovjetna krivulji  $\Delta m(p) = m(p_i) - m(p_{wf})$  u funkciji  $t$  kada su obje prikazane u logaritamskom sustavu, ali s pomakom koji je svojim iznosom jednak konstantama:

$$\log \frac{\pi k_g h}{q_g T} \frac{T_{SC}}{p_{SC}}, \quad (3.32)$$

i,

$$\log \frac{k_g}{\phi \mu_{gi} c_{ii} r_w^2} \cdot \quad (3.33)$$



Slika 3. Tipška krivulja za neograničeni radijalni sustav, konstantnog protoka na unutarnjoj granici (preuzeto iz Čikeš 2015).

### 3.1.3. Proizvodnost plinske bušotine kod poluustaljenog stanja protjecanja

Jednadžba (3.34) opisuje radijalno protjecanje fluida kroz homogenu izotropno ležište u bušotinu, a temelji se na poznatoj Forchheimerovoj jednadžbi (Forchheimer 1901). Sastoji se od člana koji opisuje pad tlaka uslijed Darcyeva laminarnog protoka i člana koji opisuje odstupanje od Darcyeva zakona kao posljedice visoke brzine protoka fluida (turbulencije).

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu}{k} v + \beta \rho v^2, \quad (3.34)$$

gdje su:

$dp$  - promjena tlaka, Pa ;

$dr$  - promjena radijusa crpljenja ležišta, m ;

$\mu$  - viskoznost fluida, Pa s ;

$k$  - propusnost ležišta, m<sup>2</sup> ;

$\beta$  - faktor turbulencije, m<sup>-1</sup> ;

$\rho$  - gustoća fluida,  $\text{kg}/\text{m}^3$  ;

$v$  - brzina fluida,  $\text{m}/\text{s}$  ;

Sukladno izvodu prikazanom u prilogu 1., uvođenjem jednadžbe stanja i sređivanjem jednadžbe (3.34), izraz za proizvodnost plinske bušotine pri poluustaljenom stanju protjecanja dobiva oblik:

$$m(p_e) - m(p_{wf}) = \frac{T q_g p_{sc}}{\pi k h T_{sc}} \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} \right] + \beta \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{q_g^2 T}{2 \pi^2 h^2 \mu_g} \left( \frac{p_{sc}}{T_{sc}} \right)^2 \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right). \quad (3.35)$$

Ovdje su:

$m(p_e)$  - funkcija pseudotlaka u području drenažnog radijusa bušotine,  $\text{Pa}^2/\text{Pa s}$  ;

$m(p_{wf})$  - funkcija pseudotlaka u kanalu bušotine,  $\text{Pa}^2/\text{Pa s}$  ;

$p_e$  - tlak u području drenažnog radijusa bušotine, Pa ;

$p_{wf}$  - tlak u kanalu bušotine, Pa ;

$T$  - temperatura ležišta, K ;

$q_g$  - objamski protok plina sveden na standardne uvjete,  $\text{m}^3/\text{s}$  ;

$p_{sc}$  - standardni tlak, 101325 Pa ;

$T_{sc}$  - standardna temperatura, 288,15 K ;

$h$  - debljina ležišta, m ;

$r_e$  - radijus crpljenja bušotine, radijus vanjske granice ležišta, m ;

$r_w$  - radijus bušotine, radijus unutarnje granice ležišta, m ;

$M_z$  - molarna masa zraka,  $0,028964 \text{ kg}/\text{mol}$  ;

$\gamma_g$  - relativna gustoća plina, dio jedinice;

$R$  - opća plinska konstanta,  $8,3145 \text{ J}/\text{K mol}$  ;

$\mu_g$  - viskoznost plina, Pa s.

Funkcija pseudotlaka  $m(p)$  definirana je kao:

$$m(p) = 2 \int_{p_{wf}}^{p_e} \left( \frac{p}{\mu_g Z} \right) dp. \quad (3.36)$$

#### 3.1.4. Koncept *skin* faktora

Idealni radijalni model pritoka fluida iz ležišta u bušotinu u realnim je uvjetima izuzetno rijedak. Koncept *skin* faktora uveo je van Everdingen (van Everdingen, 1953) kao bezdimenzijsku veličinu koja će pokazivati veličinu odstupanja aktualnog od idealnog gubitka tlaka pri protjecanju fluida iz ležišta u bušotinu. Često se za *skin* faktor upotrebljava i termin „oštećenje ležišta”. Čimbenici koji određuju to odstupanje su sljedeći:

- promjene propusnosti u pribušotinskoj zoni;
- promjene uzrokovane parcijalnim raskrivanjem ležišta i konvergencijom toka fluida u perforacije;
- odstupanja od Darcyeva zakona zbog visokih brzina protjecanja fluida (turbulencije).

S obzirom na zavisnost *skin* faktora o protoku fluida i tlaku mogu se razlikovati:

- linearni *skin* faktor  $s$ , koji je u odnosu na protok i tlak konstantan;
- efekt visokih brzina protjecanja fluida  $D$  izražen kao ekvivalentni *skin* uslijed visokih brzina protjecanja fluida  $Dq$  (eng. *rate dependent skin*), čija je veličina zavisna o tlaku i protoku.

Mogući izvori odstupanja i pripadajući *skin* faktori koji opisuju to odstupanje:

- odstupanje od Darcyeva laminarnoga protoka fluida u neoštećenom ležištu uzrokovanom visokom brzinom fluida opisuje efekt visokih brzina protjecanja fluida u neoštećenom ležištu  $D_R$ ;
- efekt oštećenja pribušotinske zone koji opisuju *skin* pribušotinske zone  $s_d$  i efekt visokih brzina protjecanja fluida u pribušotinskoj zoni  $D_d$ ;

- kombinirani efekti konvergencije toka fluida zbog parcijalnog raskrivanja ležišta te devijacije bušotine koje opisuje *skin* uslijed parcijalnog raskrivanja ležišta i devijacije bušotine  $s_{c+\Theta}$  ;
- efekti perforiranja, koje opisuju *skin* uslijed konvergencije toka fluida u perforacije  $s_p$ , *skin* uslijed kompaktne zone perforacija  $s_{dp}$  i efekt visokih brzina protjecanja fluida u kompaktnoj zoni perforacija  $D_{dp}$  ;
- ako je postavljen pješčani zasip dodatne otpore protjecanju opisuju *skin* uslijed pješčanog zasipa  $s_G$  i efekt visokih brzina protjecanja fluida u pješčanom zasipu  $D_G$  ;
- odstupanje realnog od idealnog radijalnog drenažnog oblika opisuje *skin* uslijed promjene drenažnog oblika  $s_A$  ;
- efekt blokade uslijed zasićenja kondenzatom u pribušotinskoj zoni, koji je karakterističan samo za plinsko-kondenzatna ležišta, opisuje *skin* uslijed blokade kondenzata  $s_b$  ;

Ukupni linearni *skin*  $s$  jednak je (Golan & Whitson, 1995):

$$s = s_{c+\Theta} + s_G + s_{dp} + \left(\frac{h}{h_p}\right)s_p + \left(\frac{h}{h_p}\right)s_d, \quad (3.37)$$

dok je ukupni ekvivalentni *skin* uslijed turbulencije fluida jednak (Golan & Whitson, 1995):

$$D = D_R + D_d + D_{dp} + D_G. \quad (3.38)$$

Matematički izrazi za svaki pojedini *skin* raspoloživi su u velikom broju publikacija, između ostalih Golan & Whitson (1995) i Čikeš (2004).

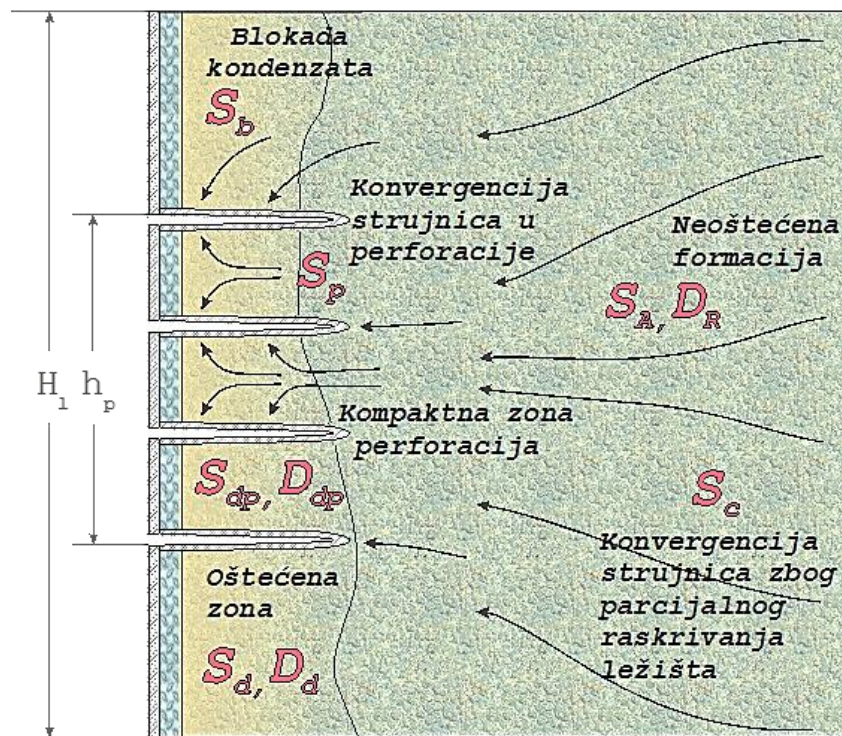
Opći izraz za proizvodnost plinske bušotine pri poluustaljenom stanju protjecanja, koji uključuje sva odstupanja od idealnog radijalnog modela ima konačan oblik (Golan & Whitson, 1995, Prilog 1):

$$m(\bar{p}_R) - m(p_{wff}) = \frac{T}{\pi k h T_{SC}} q_g \left[ \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + s + D q_g \right]. \quad (3.39)$$

Vrijednost  $s + Dq$  može se izraziti kroz ukupni *skin* faktor  $s'$  koji objedinjuje sva odstupanja od idealnog radijalnog modela prema obrascu:

$$s' = s + Dq. \quad (3.40)$$

Hidrodinamska mjerenja jedini su pravi pokazatelj vrijednosti stvarnog oštećenja ležišta. Za određivanje ukupnog *skin* faktora koristi se test porasta tlaka, dok se pomoću testa uz više uvjeta protoka, mogu odvojeno odrediti veličine *skina* uslijed visokih brzina protjecanja fluida i laminarnoga *skina*. Slika 4. daje pojednostavljeni prikaz strujnog toka fluida kroz neoštećeni dio ležišta, pribušotinsku zonu i perforacije u zacijevljeni vertikalni kanal bušotine i karakteristične *skin* efekte koji se mogu u tim područjima toka pojaviti.



Slika 4. Pojednostavljeni prikaz strujnog toka fluida i karakterističnih *skin* efekata konvencionalno zacijevljene bušotine s perforacijama u području ležišta bez pješčanog zasipa.

### 3.1.5. Bezdimenzijski indeks proizvodnosti kod poluustaljenog stanja protjecanja plinskih bušotina

Indeks proizvodnosti jedinstvena je mjera sposobnosti bušotine da pri jediničnoj depresiji iz nekog ležišta proizvodi fluid. Opći izraz za indeks proizvodnosti bušotine određen je jednažbom:

$$J = \frac{q}{\bar{p} - p_{wf}} = \frac{2\pi kh}{\alpha B \mu} J_D. \quad (3.41)$$

Kod plinskih bušotina uvođenjem jednažbe stanja preko volumetrijskog faktora za plin i funkcije pseudotlaka  $m(p)$ , nakon sređivanja, jednažba poprima slijedeći oblik:

$$J = \frac{q}{m(\bar{p}) - m(p_{wf})} = \frac{2\pi kh}{\alpha T} J_D,$$

gdje je  $J_D$  bezdimenzijski indeks proizvodnosti jednak:

$$J_D = \frac{1}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + s'}. \quad (3.42)$$

### 3.1.6. Koncept efektivnog radijusa i ekvivalentnog *skin* faktora bušotine

U praktičnoj upotrebi indeksa proizvodnosti nezamjenjivu ulogu ima koncept efektivnog radijusa bušotine. Uveli su ga Prats et al. (1962) jednostavnim ponovnim aranžiranjem izraza (3.42) na niže prikazan način,

$$J = \frac{\pi k h T_{sc}}{T p_{sc}} \frac{1}{\left[ \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + \ln(e^{s'}) - \frac{3}{4} \right]} = \frac{\pi k h T_{sc}}{T p_{sc}} \frac{1}{\left[ \ln\left(\frac{r_e}{r_w e^{-s'}}\right) - \frac{3}{4} \right]} = \frac{\pi k h T_{sc}}{T p_{sc}} \frac{1}{\left[ \ln\left(\frac{r_e}{r'_w}\right) - \frac{3}{4} \right]}, \quad (3.43)$$

gdje je efektivni radijus bušotine  $r'_w$  jednak:

$$r'_w = r_w e^{-s}. \quad (3.44)$$

Bezdimenzijski indeks proizvodnosti kod poluustaljenog stanja protjecanja  $J_D$  u tom se slučaju može odrediti iz sljedeće jednažbe:

$$J_D = \frac{1}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w'}\right) - \frac{3}{4}}. \quad (3.45)$$

Uvođenjem efektivnog radijusa bušotine, a temeljem ekvivalentnog *skin* faktora, postalo je moguće analizirati i usporediti proizvodnosti za različite načine opremanja (zacjevljena bušotina, otvoreni kanal, frakturirana, pješčani zasip, ...) i geometrije bušotine (kosa, horizontalna, multilateralna bušotina), s ekvivalentnom vertikalnom bušotinom unutar istog ležišta.

### 3.1.7. Bezdimenzijski indeks proizvodnosti i ekvivalentni *skin* faktor frakturiranih ležišta kod poluustaljenog stanja protjecanja

Svaka hidraulički stvorena fraktura s podupiračem može se u proizvodnom smislu jednoznačno odrediti kroz njenu propusnu duljinu gdje se pretpostavlja da postoje dva ista krila iste tzv. poluduljine  $x_f$ , kroz njenu širinu  $w$  i bezdimenzijsku provodljivost frakture  $C_{fD}$  čiji izraz ima oblik:

$$C_{fD} = \frac{k_f w}{k x_f}. \quad (3.46)$$

Bezdimenzijska provodljivost frakture u svojoj osnovi predstavlja mjeru relativne sposobnosti frakture da provodi fluide u bušotinu u odnosu na sposobnost ležišta da napaja tu frakturu. Kod hidraulički frakturiranih ležišta nekoliko je načina uvođenja efekta frakturiranja u indeks proizvodnosti. Sljedeća tri su najpoznatija:

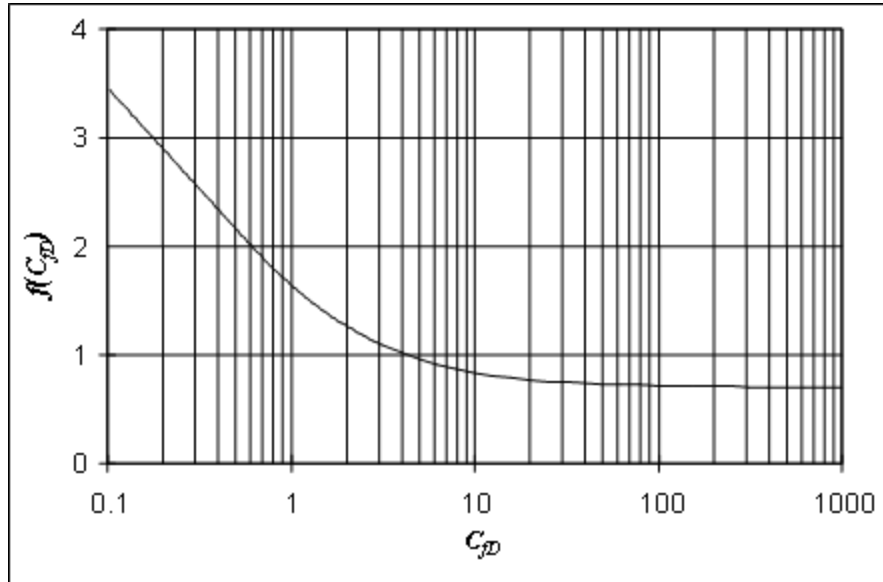
- a) model bezdimenzijskog efektivnog radijusa bušotine za hidraulički frakturirana ležišta, (Prats et al., 1962);
- b) model ekvivalentnog *skin* faktora za hidraulički frakturirana ležišta, (Cinco-Ley i Samaniego, 1981);
- c) UFD (engl. *Unified Fracture Design*) postupak, (Economides et al., 2002).

Sva tri modela u konačnici daju isti rezultat, no treba spomenuti da se u svjetskoj praksi najčešće koristi model Cinco-Leya i Samaniega (1981). U tom su modelu autori postavili u korelativni odnos bezdimenzijsku vodljivost frakture  $C_{fD}$  i funkciju  $f(C_{fD})$  koja je jednoznačno određena poluduljinom frakture  $x_f$  i ekvivalentnim *skin* faktorom uslijed frakturiranja  $s_f$  prema obrascu:



$$f(C_{fD}) = s_f + \ln\left(\frac{x_f}{r_w}\right). \quad (3.47)$$

Slika 5. prikazuje korelativni odnos bezdimenzijske provodljivost frakture  $C_{fD}$  i funkcije  $f(C_{fD})$ .



Slika 5. Korelativni odnos bezdimenzijske provodljivost frakture  $C_{fD}$  i funkcije  $f(C_{fD})$  (Cinco-Ley i Samaniego, 1981).

Analitički izraz funkcije  $f(C_{fD})$  ima slijedeći oblik:

$$f(C_{fD}) = \frac{1.65 - 0.328u + 0.116u^2}{1 + 0.18u + 0.064u^2 + 0.005u^3}, \quad (3.48)$$

gdje je:

$$u = \ln(C_{fD}). \quad (3.49)$$

Za  $C_{fD} > 1000$ ,  $f(C_{fD}) = \ln(2)$ . Funkcija  $f(C_{fD})$  izravno se uvodi u izraz za bezdimenzijski indeks proizvodnosti  $J_D$  na slijedeći način:

$$J_{fD} = \frac{1}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + s_f - \frac{3}{4}} = \frac{1}{\ln\left(\frac{r_e}{x_f}\right) + \left(s_f + \ln\frac{x_f}{r_w}\right) - \frac{3}{4}}. \quad (3.50)$$

### 3.1.8. Izdašnost dotoka

Izdašnost dotoka,  $FE$  (engl. *Flow Efficiency*) relativna je mjera efikasnosti protjecanja fluida iz ležišta u bušotinu. Određena je izrazom:

$$FE = \frac{J_{sD}}{J_D} = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4}}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + s}. \quad (3.51)$$

Za stimulacijski efekt, ako se radi o frakturiranoj bušotini (analogno ako se radi o kemijskoj obradi) koja prije tretmana može imati (ili ne) određeni *skin*, najčešće se koristi anglosaksonski termin „*Folds of Increase*“ ( $FOI$ ) ili interpretirano, mjera relativnog povećanja indeksa proizvodnosti,

$$FOI = \frac{J_{fD}}{J_{sD}} = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + s}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + s_f}. \quad (3.52)$$

Izdašnost dotoka jedan je od glavnih alata za vrednovanje i optimalizaciju različitih načina opremanja i geometrije bušotina unutar nekog ležišta.

### 3.1.9. Procjena proizvodnog potencijala tanko proslojenih ležišta opremljenih konvencionalnim pješčanim zasipom u zacjevljenom kanalu bušotine

Tanko proslojena ležišta možemo promatrati kao niz paralelnih izmjena propusnih „mini“ hidrodinamskih cjelina i isto tako tankih izmjena nepropusnih slojeva. Proizvodni kapacitet svakog takvog „mini“ ležišta karakterizira njegova efektivna propusnost  $k_{g,i}$  i debljina  $h_{g,i}$  te vrijednost oštećenja  $s'_i$ . Pod pretpostavkom da svi proslojci imaju isti ležišni tlak  $\bar{p}_R$ , drenažni radijus  $r_e$  te sastav plina, proizvodnost svakog pojedinog proslojka  $i$  može se izraziti obrascem:

$$q_{g,SC,i} = \frac{T_{SC}}{p_{SC}} \frac{\pi k_{g,i} h_{g,i} \left[ m(\bar{p}_R) - m(p_{wf}) \right]}{T \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - 0,75 + s'_i \right]}, \quad (3.53)$$

a ukupni proizvodni kapacitet čitavog paketa suma je proizvodnog kapaciteta svakog pojedinog „mini“ ležišta:

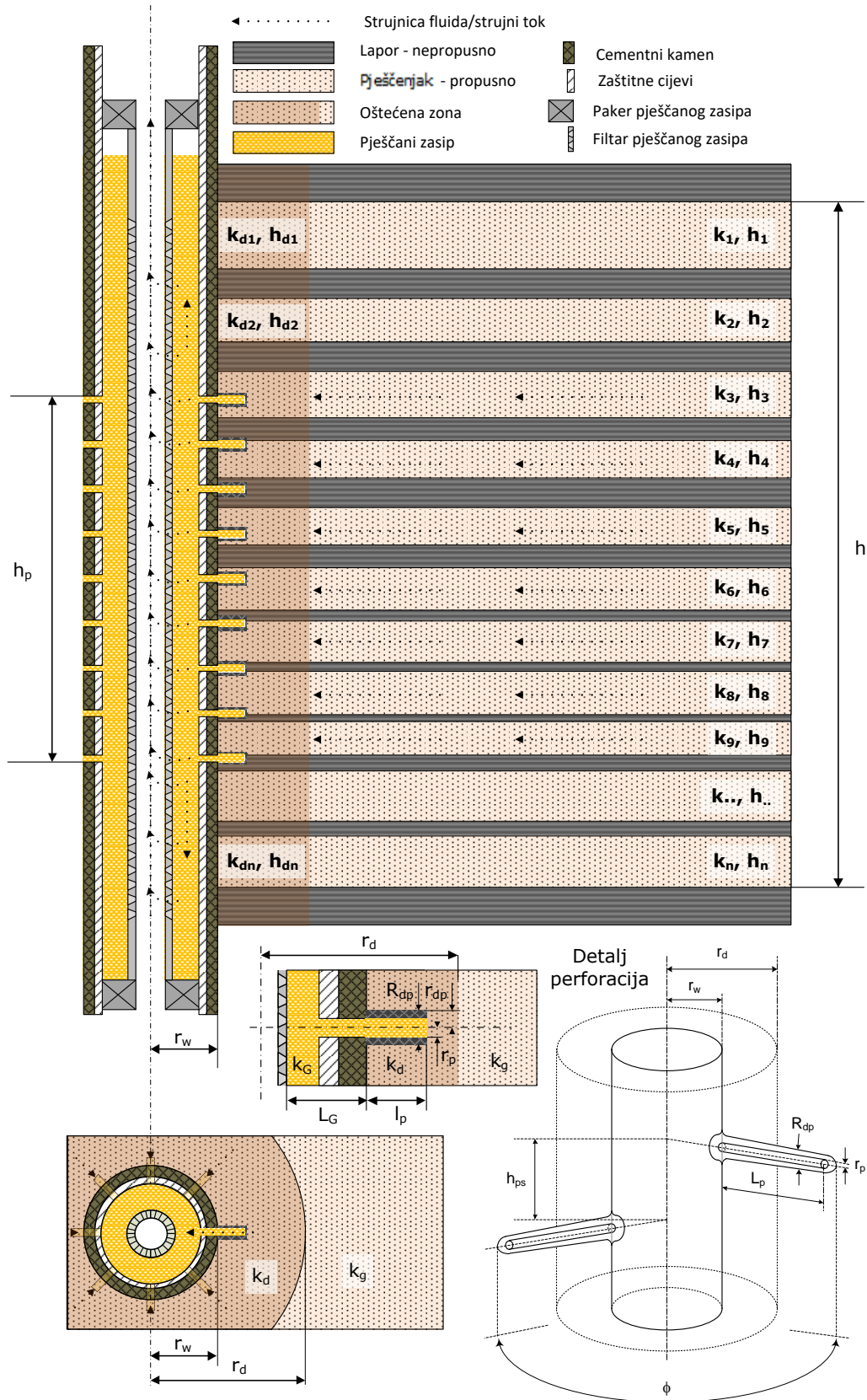
$$q_{g,SC,ukupno} = \sum_{i=1}^n q_{g,SC,i} . \quad (3.54)$$

Slika 6. prikazuje model pritjecanja plina iz tanko proslojenog ležišta u konvencionalno zacjevljenu bušotinu s perforacijama opremljenu pješčanim zasipom. Uz poznatu distribuciju vrijednosti propusnosti  $k_{g,i}$  i odnosnih debljina ležišta  $h_{ef,g,i}$ , za procjenu ukupnog proizvodnog potencijala potrebno je procijeniti vrijednost ukupnog oštećenja  $s'_i$  svakog raskrivenog „mini“ ležišta. Ukupni linearni *skin*  $s_i$  pojedinog „mini“ ležišta za ovaj način opremanja jednaka je:

$$s_i = s_{c+\Theta,i} + s_{dp,i} + s_{p,i} + s_{d,i} + s_{G,i} , \quad (3.55)$$

dok je ukupni ekvivalentni *skin* uslijed visokih brzina protjecanja  $D_i$  jednak:

$$D_i = D_{R,i} + D_{d,i} + D_{dp,i} + D_{G,i} . \quad (3.56)$$



Slika 6. Model pritjecanja plina iz tanko proslojenog ležišta u konvencionalno zacjevljenu bušotinu s perforacijama opremljenu pješčanim zasipom.

### 3.1.10. UFD (engl. *Unified Fracture Design*) postupak procjene indeksa proizvodnosti hidraulički frakturiranih ležišta

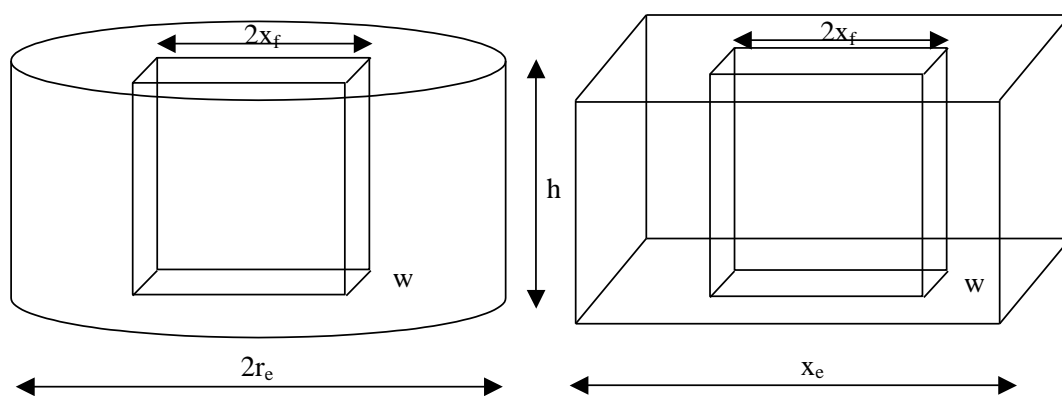
Valko & Economides (1998) uveli su novi optimalizacijski postupak određivanja optimalne geometrije frakture u svrhu maksimiziranja indeksa proizvodnosti pri poluustaljenom stanju protjecanja u realističnom kvadratnom drenažnom volumenu. Postupak je kasnije (Economides et al., 2002) dodatno razrađen i nazvan UFD postupak (engl. *Unified Fracture Design*). Temelji se na postulatu da za neko ležište poznate propusnosti i dimenzija (volumena, drenažnog područja), masa utisnutog podupirača u efektivno propusni dio ležišta određuje jedan jedinstveni, tzv. „broj podupirača“  $N_{prop}$ . Za taj jedinstveni broj postoji jedinstvena optimalna bezdimenzijska vodljivost frakture  $C_{fd,opt}$ , koja ekskluzivno određuje optimalnu geometriju frakture, odnosno njenu poluduljinu  $x_f$  i širinu  $w$ . UFD postupak karakterizira činjenica da je bezdimenzijski index proizvodnosti  $J_D$  izravno u funkciju broja podupirača  $N_{prop}$ . U daljnjem tekstu prikazan je teoretski koncept i metodologija procjene indeksa proizvodnosti pomoću UFD postupka. Sva razmatranja odnose se na bilinearni protok kroz ležište i frakturu ograničene vodljivosti i smještene u homogenom i izotropnom ležištu.

Slika 7. prikazuje bazični model vertikalne frakture smještene unutar homogenog izotropnog ležišta u punoj visini. Prikazane su dvije drenažne površine (dva oblika), kružna i kvadratna, pri čemu treba napomenuti da je odabir samo stvar pogodnosti prikaza budući da je razmatrana drenažna površina ista nezavisno o obliku i vrijedi:

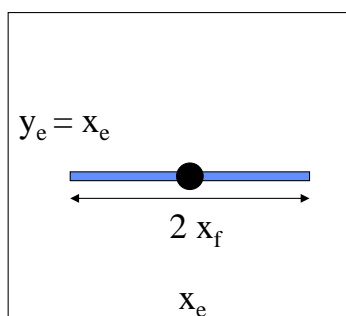
$$A = r_e^2 \pi = x_e^2. \quad (3.57)$$

Analogno, drenažni volumen ležišta  $V_{drenažni}$  jednak je

$$V_{drenažni} = r_e^2 \pi h = x_e^2 h. \quad (3.58)$$



Slika 7. Model vertikalne frakture unutar kružne odnosno kvadratne drenažne površine - volumena, preuzeto iz Valko (2006).



Slika 8. Model vertikalne frakture unutar kvadratnog drenažnog volumena, preuzeto iz Valko (2006).

Za vertikalnu bušotinu koja po sredini probada kvadratnu vertikalnu frakturu, a koja u punoj visini od vrha do dna penetrira unutar kvadratnog drenažnog volumena, proizvodnost bušotine osim o vrijednosti bezdimenzijske provodljivosti frakture  $C_{fd}$  zavisi i o penetracijskom odnosu u horizontalnom smjeru (osi x),  $I_x$ :

$$I_x = \frac{2x_f}{x_e}. \quad (3.59)$$

Bezdimenzijski broj podupirača,  $N_{prop}$  (engl. *Proppant Number*) definiran je kao umnožak kvadrata penetracijskog odnosa  $I_x$  i bezdimenzijske provodljivosti frakture  $C_{fd}$  (Economides et al., 2002):

$$N_{prop} = I_x^2 C_{fd}, \quad (3.60)$$

iz čega proizlazi,

$$N_{prop} = \frac{4k_f x_f w}{k x_e^2}. \quad (3.61)$$

Jednadžba (3.61) se može interpretirati kao odnos površina frakture ispunjene podupiračem i drenažne površine. Ukoliko se ista u brojniku i nazivniku pomnoži s efektivnom debljinom ležišta  $h_{ef}$ , dobiva se (Economides et al., 2002):

$$N_{prop} = \frac{4k_f x_f w h_{ef}}{k x_e^2 h_{ef}} = \frac{4k_f V_{prop-ukrilo}}{k V_{drenažni}}, \quad (3.62)$$

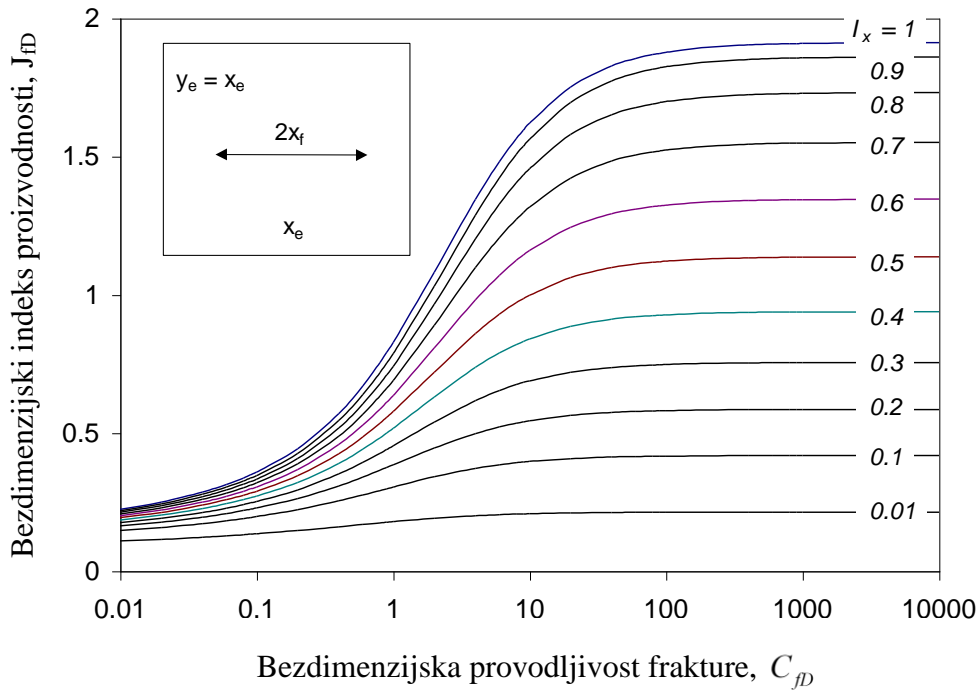
odnosno,

$$N_{prop} = \frac{2k_f}{k} \frac{V_{prop-2krila}}{V_{drenažni}}. \quad (3.63)$$

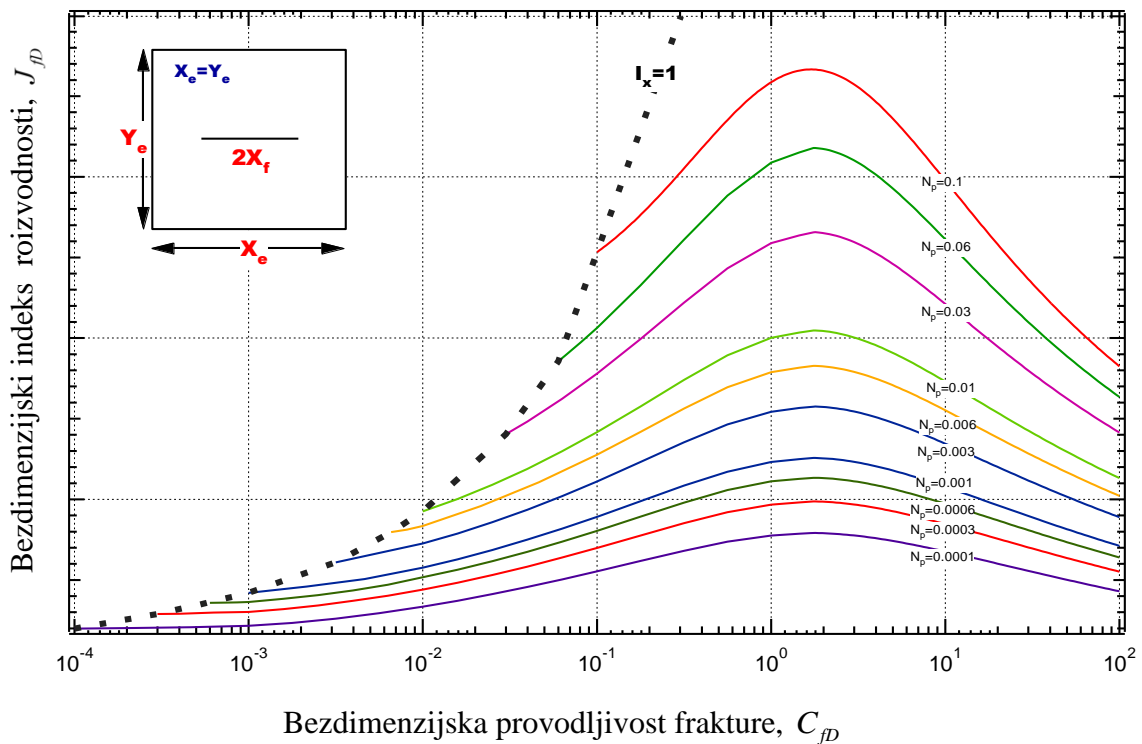
Broj podupirača  $N_{prop}$  tada predstavlja odnos volumena frakture ispunjene podupiračem i drenažnog volumena pomnožen s dvostrukim odnosom propusnosti podupirača u frakturi i efektivne propusnosti ležišta. Potrebno je naglasiti da se volumen podupirača u frakturi odnosi samo na onaj volumen koji pokriva propusnu površinu ležišta koje presijeca fraktura, ne i onaj koji pokriva nepropusni dio. Dakle, samo onaj koji pokriva  $h_{ef}$  bez obzira koliki je  $h_f$ . Ukupni volumen podupiraču koji je utisnut u propusni dio ležišta tada se računa prema obrascu (Economides et al., 2002):

$$V_{prop-2krila} = \frac{m_{prop} \left( \frac{h_{ef}}{h_f} \right)}{(1 - \Phi_{prop}) \rho_{prop}}. \quad (3.64)$$

Slika 9. prikazuje međuzavisnost bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti  $J_{fD}$  kao funkcije bezdimenzijske provodljivosti frakture  $C_{fD}$  i penetracijskog odnosa  $I_x$  koju su publicirali McGuire & Sikora (1960). Slijedeći njihovu filozofiju, Valko & Economides (1998) su u funkcijski odnos umjesto penetracijskog odnosa  $I_x$  uveli broj podupirača  $N_{prop}$ . Slika 10. i slika 11. prikazuju bezdimenzijski indeks proizvodnosti  $J_{fD}$  u funkciji bezdimenzijske provodljivosti frakture  $C_{fD}$  i broja podupirača  $N_{prop}$ .

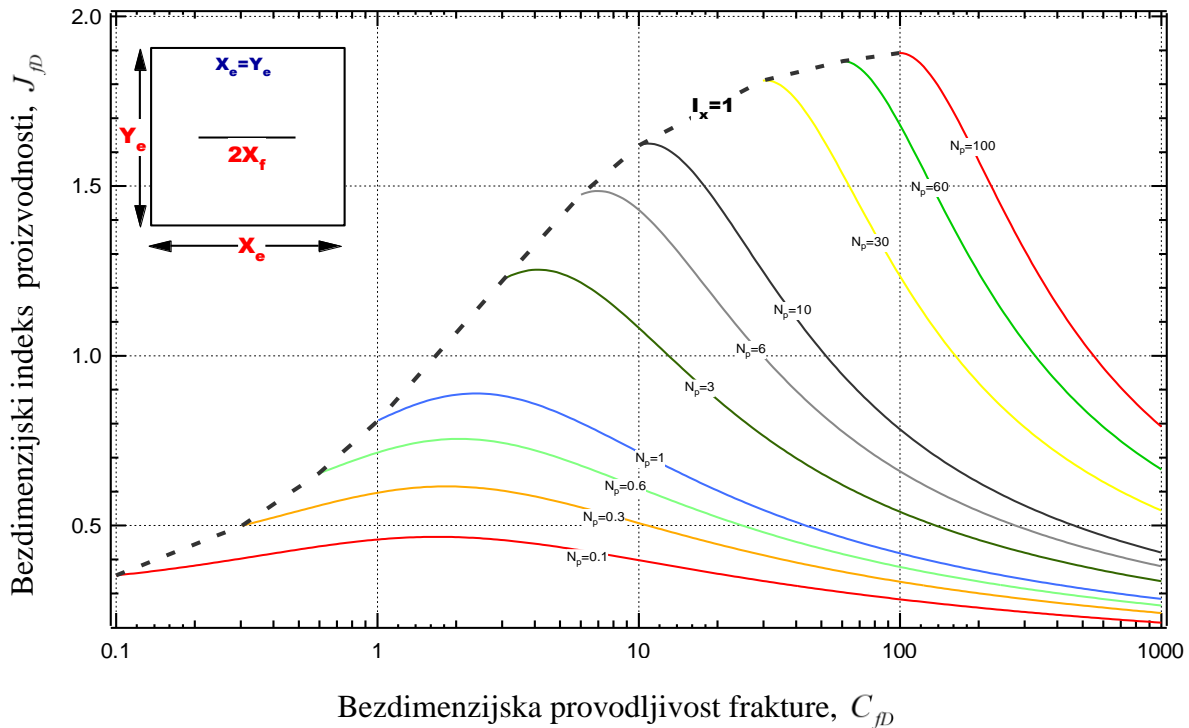


Slika 9. McGuire & Sikora (1960) prezentacija bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti  $J_{fD}$  kao funkcije bezdimenzijske provodljivosti frakture i penetracijskog odnosa  $I_x$ , preuzeto iz Valko (2006).



Slika 10. Bezdimenzijski indeks proizvodnosti  $J_{fD}$  kao funkcija bezdimenzijske provodljivosti frakture  $C_{fD}$  i broja podupirača  $N_{prop}$ , za  $N_{prop} \leq 0,1$ , preuzeto iz Valko (2006).





Slika 11. Bezdimenzijski indeks proizvodnosti  $J_{fD}$  kao funkcija bezdimenzijske provodljivosti frakture  $C_{fD}$  i broja podupirača  $N_{prop}$ , za  $N_{prop} \geq 0,1$ , preuzeto iz Valko (2006).

Na slici 10. i slici 11. vidi se da za određenu vrijednost broja podupirača,  $N_{prop}$  postoji maksimum krivulje kod koje je vrijednost bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti  $J_{fD}$  najveća moguća. Za određenu vrijednost broja podupirača,  $N_{prop}$ , odnosno za točno određenu količinu injektiranog podupirača, postoji optimalna bezdimenzijska vodljivost frakture  $C_{fD,opt}$ .

Za ležišta niskih propusnosti, gdje je  $N_{prop} > 0,1$  (slika 11.), za svaki volumen (masu) utisnutog podupirača postoji jedna jedinstvena optimalna bezdimenzijska vodljivost frakture  $C_{fD,opt}$  koju karakterizira optimalni kompromis između točno određene širine frakture  $w$  i točno određene poluduljine frakture  $x_f$ . Za srednje propusna i visoko propusna ležišta, odnosno gdje je  $N_{prop} \leq 0,1$  (slika 10.), optimalna bezdimenzijska vodljivost frakture je konstantna i iznosi  $C_{fD,opt} = 1,6$ .

Temeljem prikazanog, Economides et al. (2002) su dali i korelacije za maksimalno mogući bezdimenzijski indeks proizvodnosti  $J_{fD,max}$ :

$$J_{fD,max}(N_{prop}) = \begin{cases} \frac{1}{0,990 - 0,5 \ln(N_{prop})} & \text{za } N_{prop} \leq 0,1 \\ \frac{6}{\pi} - \exp \left[ \frac{0,423 - 0,311 N_{prop} - 0,089 (N_{prop})^2}{1 + 0,667 N_{prop} + 0,015 \ln(N_{prop})^2} \right] & \text{za } N_{prop} > 0,1 \end{cases}, \quad (3.65)$$

i za odnosnu optimalnu bezdimenzijsku provodljivost frakture  $C_{fD,opt}$ :

$$C_{fD,opt}(N_{prop}) = \begin{cases} 1,6 & \text{za } N_{prop} < 0,1 \\ 1,6 + \exp \left[ \frac{-0,538 + 1,48 \ln(N_{prop})}{1 + 0,142 \ln(N_{prop})} \right] & \text{za } 0,1 \leq N_{prop} \leq 10 \\ N_{prop} & \text{za } N_{prop} > 10 \end{cases}. \quad (3.66)$$

Nakon što je poznata optimalna bezdimenzijska provodljivost frakture  $C_{fD,opt}$ , volumen podupirača  $V_f$  koji prekriva efektivnu debljinu ležišta  $h_{ef}$  u jednom krilu frakture može se odrediti iz izraza:

$$V_f = \frac{V_{prop-2krila}}{2}, \quad (3.67)$$

tako da je optimalnu poluduljinu frakture  $x_{f,opt}$  moguće izračunati prema obrascu (Economides et al., 2002):

$$x_{f,opt} = \left( \frac{V_f k_f}{C_{fD,opt} h_{ef} k} \right)^{1/2}, \quad (3.68)$$

a optimalnu širinu frakture  $w_{opt}$  prema obrascu:

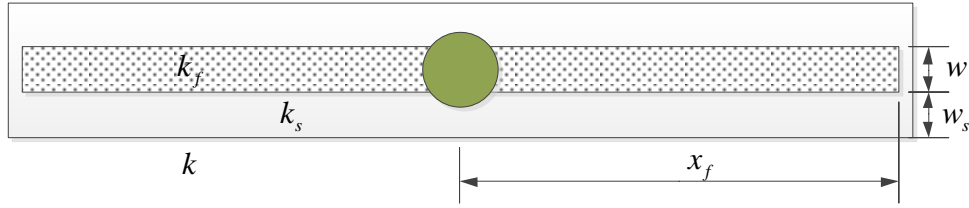
$$w_{opt} = \left( \frac{C_{fD,opt} V_f k}{h_{ef} k_f} \right)^{1/2}. \quad (3.69)$$

Indeks proizvodnosti izračunat prema obrascu (3.65) i geometrija frakture koja proizlazi iz optimalne bezdimenzijske provodljivosti frakture dobivene iz obrasca (3.66) temeljeni su na idealnim uvjetima protjecanja fluida iz ležišta u frakturu i dalje u bušotinu. Aktualni indeks proizvodnosti frakturiranog ležišta značajno može odstupati od prikazanih idealiziranih modela. Taj dodatni gubitak tlaka, ili kako se često naziva oštećenje, uzrokovan je jednim ili kombinacijom sljedećih faktora:

- promjenom propusnosti na licu frakture kao posljedice procesa filtracije radnog fluida u ležište i/ili promjena propusnosti na licu frakture kao posljedice procesa uleknuća podupirača (engl. *Proppant Embedment*) u ležište, a opisuje ga *skin* uslijed oštećenja lica frakture  $s_{ff}$  ;
- smanjenje provodljivosti uslijed prigušenja frakture (engl. *Fracture Choking*) u pribušotinskoj zoni kao posljedice prepumpavanja podupirača u ležište (engl. *Proppant Overdisplacement*) ili iznošenja podupirača tijekom proizvodnje (engl. *Proppant Flowback*) a opisuje ga *skin* uslijed prigušenja frakture  $s_{ck}$  ,
- efekta turbulencije u frakturi kao posljedice protoka fluida u turbulentnom području;
- naprezanjima u frakturi i kompakcijom podupirača kao posljedice težnje ležišne stijene k zatvaranju frakture što za posljedicu ima smanjenje efektivne propusnosti podupirača frakture;
- promjena propusnosti u frakturi uzrokovanih čepljenjem međuprostora pakiranog podupirača ležišnim materijalom (engl. *Fines*), eventualno mrvljenjem podupirača (engl. *Proppant Crashing*) i/ili ostacima neraspadnutog gela;
- promjena relativnih propusnosti u frakturi zbog višefaznog protjecanja.

Utjecaj svakog faktora na veličinu indeksa proizvodnosti, samostalno ili u kombinaciji, uračunava se kroz odnosni *skin* efekt i/ili u obliku efektivne propusnosti frakture.

*Skin* uslijed oštećenja lica frakture  $s_{ff}$  nastaje kao posljedica procesa filtracije radnog fluida u ležište. Posljedice tog procesa su formiranje polimernog kolača na licu frakture kojeg je često i uz pravilnu uporabu dodataka za razbijanje polimera (engl. *Breaker*) teško u potpunosti ukloniti. Tijekom filtracije određena količina polimera uđe i u pore i prsline lica ležišta, rezultirajući oštećenjem na licu frakture. Filtrat radnog fluida prodire znatno dublje u ležište te može privremeno uzrokovati promjene propusnosti šireg areala. Isti matematički model oštećenja vrijedi i za promjene propusnosti na licu frakture kao posljedice procesa zabadanja podupirača u ležište. Utjecaj spomenutih procesa samostalno ili u kombinaciji, prvi su opisali Cinco-Ley et al. (1977) uvođenjem *skina* uslijed oštećenja lica frakture,  $s_{ff}$  . Slika 12. predočava model *skina* uslijed oštećenja lica frakture.



Slika 12. Model oštećenja lica frakture (Cinco-Ley et al., 1977).

Autori su ovaj fenomen opisali kao funkciju dubine oštećenja  $w_s$  i efektivne propusnosti odnosne oštećene zone  $k_s$ :

$$s_{ff} = \frac{\pi w_s}{2x_f} \left( \frac{k}{k_s} - 1 \right). \quad (3.70)$$

Budući da ovaj model ne uvažava doprinos radijalnog oštećenja pribušotinske zone koje gotovo uvijek u određenom stupnju postoji, Mathur et al. (1995) su proširili originalni izraz uvođenjem ekvivalentne propusnosti  $k'$ :

$$k' = \frac{b_1}{x_f} \left[ \frac{b_1 k_d k_{d,s}}{(b_1 - w_s) k_{d,s} + w_s k_d} + \frac{(x_f - b_1) k k_s}{(b_1 - w_s) k_s + w_s k_d} \right], \quad (3.71)$$

gdje su u originalnom izrazu (3.70) propusnost oštećene zone frakture  $k_s$  zamijenili s vrijednošću ekvivalentne propusnosti  $k'$ . Nakon sređivanja jednadžbe (3.70) konačan izraz za kombinirani *skin* uslijed oštećenja lica frakture i oštećenja pribušotinske zone  $s_{ff,d}$  poprima slijedeći oblik (Mathur et al., 1995):

$$s_{ff,d} = \frac{\pi}{2} \left[ \frac{w_s k}{b_1 k_{d,s} + (x_f - b_1) k_s} + \frac{(b_1 - w_s) k}{b_1 k_d + (x_f - b_1) k} + \frac{b_1}{x_f} \right]. \quad (3.72)$$

Slika 13. prikazuje model kombiniranog *skina* uslijed oštećenja lica frakture i oštećenja pribušotinske zone. Radijalna površina oštećenja pribušotinske zone u ovom je modelu zamijenjena kvadratnom površinom oštećenja pribušotinske zone  $4b_1^2$ .



Ukoliko se radi o smanjenju propusnosti frakture u pribušotinskoj zoni, bilo da je došlo do suženje frakture ili ne, *skin* uslijed prigušenja frakture  $s_{ck,k}$  se može izračunati prema slijedećem obrascu (Romero et al., 2002):

$$s_{ck,k} = \frac{\pi x_{ck}}{x_f} \left( \frac{k_f}{k_{f,ck}} - 1 \right), \quad (3.75)$$

gdje su  $x_{ck}$  duljina oštećenog dijela frakture (suženja),  $w_{ck}$  širina oštećenog dijela frakture (suženja) te  $k_{f,ck}$  propusnost oštećenog dijela frakture. Budući da se oštećenje nalazi isključivo unutar frakture, ovaj *skin* utjecat će na pad tlaka isključivo kroz frakturu.

Usporedi li se efekt *skina* uslijed oštećenja lica frakture,  $s_{ff}$  i *skina* uslijed prigušenja frakture  $s_{ck}$ , potonji je manje kompleksan (Valko & Economides, 1988). Objašnjenje leži u činjenici da *skin* uslijed prigušenja frakture pridonosi dodatnom gubitku tlaka na samom ulazu u bušotinu, ne mijenjajući smjer toka fluida, odnosno smjer strujnica po duljini frakture. S druge strane, *skin* uslijed oštećenja lica frakture uzrokuje relativnu redistribuciju strujnica duž frakture, a neravnomjernost oštećenja po dužini frakture samo pojačava taj efekt (Valko & Economides, 1988).

Bezdimenzijski indeks proizvodnosti  $J_{fD}$  koji uključuje *skin* uslijed oštećenja lica frakture i *skin* uslijed prigušenja frakture tada se može izračunati prema slijedećem obrascu (Valko & Economides, 1988):

$$J_{fD} = \frac{1}{\frac{1}{J_{D|s=0}} + s_{ff,d} + s_{ck,w} + s_{ck,k}}, \quad (3.76)$$

gdje je  $J_{D|s=0}$  bezdimenzijski indeks proizvodnosti u idealnim uvjetima protoka (bez oštećenja). Bezdimenzijski indeks proizvodnosti  $J_{fD}$  za srednje i visoko propusna ležišta ( $N_{prop} \leq 0,1$ ) u tom slučaju iznosi (Valko, 2006):

$$J_{fD} = \frac{1}{0.990 - 0.5 \ln(N_{prop}) + s_{ff,d} + s_{ck,w} + s_{ck,k}}. \quad (3.77)$$

Prikazana zakonitost ne vrijedi kada protok u frakturi uđe u područje visokih brzina protjecanja fluida. Razlog tome leži u činjenici da efektivni broj podupirača  $N_{prop}$  zavisi o

aktualnoj linearnoj brzini fluida u frakturi. Posljedica je da efektivni broj podupirača  $N_{prop}$  varira budući da se nominalna propusnost frakture-podupirača u zavisnosti o veličini protoka mijenja što za posljedicu pak ima promjene u dimenzijama optimalne širine i duljine frakture. Kod plinskih bušotina ovaj je efekt značajan. Da bi se pri projektiranju pravilno valorizirao utjecaj ovog fenomena, uveden je koncept efektivne propusnosti frakture koji je temeljen na principu kako slijedi:

Darcyjev zakon opisuje laminarni protok fluida kroz poroznu sredinu gdje je gradijent tlaka upravo proporcionalan brzini protoka:

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = \frac{\mu}{k_f} v. \quad (3.78)$$

S porastom brzine protjecanja, odstupanja od jednadžbe (3.78) postaju značajna. Dodatni gubitak tlaka nastaje kao posljedica učestalih ubrzanja i smanjenja brzina i mijenjanja smjera molekula fluida. Gubitak tlaka u takvim uvjetima protjecanja opisan je u jednadžbi Forchheimera (1901):

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = \frac{\mu}{k_f} v + \beta \rho v^2. \quad (3.79)$$

U slučaju malih brzina drugi član jednadžbe  $\beta \rho v^2$  može se zanemariti. S porastom brzine protjecanja on postaje, posebno za fluide male viskoznosti (plin), iznimno važan.

Podijelimo li jednadžbu (3.78) za laminarni protok s umnoškom  $\mu v$  dobivamo:

$$\frac{\Delta p}{\Delta L \mu v} = \frac{1}{k_f}. \quad (3.80)$$

Podijelimo li i jednadžbu (3.79) za ukupni protok s umnoškom  $\mu v$  dobivamo:

$$\frac{\Delta p}{\Delta L \mu v} = \frac{1}{k_f} + \frac{\beta \rho v}{\mu}. \quad (3.81)$$

Kombiniranjem jednadžbe (3.80) i (3.81) može se izraziti tzv. efektivna propusnost frakture,  $k_{f,ef}$  koja odražava ukupni pad tlaka ekvivalentan samo Darcyjevu području protjecanja uvažavajući i efekt turbulencije:

$$\frac{1}{k_{f,ef}} = \frac{1}{k_f} + \frac{\beta \rho v}{\mu} \quad (3.82)$$

Sređivanjem jednadžbe (3.82) dobiva se izraz za efektivnu propusnost frakture,  $k_{f,ef}$  :

$$k_{f,ef} = \frac{k_f}{1 + \frac{k_f \beta \rho v}{\mu}} \quad (3.83)$$

Ovdje je  $k_f$  propusnost podupirača mjerena u uvjetima laminarnoga protjecanja.

Svaki proizvođač obično u specifikaciji podupirača daje i tablicu s rezultatima eksperimentalnih mjerenja zavisnosti propusnosti frakture  $k_f$  i faktora turbulencije  $\beta$  u odnosu na efektivno naprezanje u frakturi  $\sigma_{ff}$ . Mjerenja se vrše jednofaznim fluidom (mjeri se apsolutna propusnost) u laminarnom području protjecanja. Tablica 1. daje primjer tablice s rezultatima eksperimentalnih mjerenja i to za podupirač koji se uglavnom koristi na lokalitetu Sjeverni Jadran. Vrijednost efektivnog naprezanja koje djeluje na podupirač frakture  $\sigma_{ff}$  određena je izrazom:

$$\sigma_{ff} = p_c - p_f \quad (3.84)$$

pri čemu je  $p_c$  tlak zatvaranja frakture a  $p_f$  tlak unutar frakture.

Faktor turbulencije  $\beta$  svojstvo je poroznog medija (Valko & Economides, 1996). Vrijednost faktora turbulencije dobiva se eksperimentalno u laboratoriju ili se pak određuje temeljem empirijskih korelacija različitih autora. Opći izraz za proračun faktora turbulencije koji objedinjuje praktički sve korelacije relevantnih autora prikazuje se kao funkcija propusnosti podupirača mjerena u laminarnim uvjetima protjecanja pri aktualnim uvjetima naprezanja unutar frakture  $k_f$  i poroziteta podupirača u istim uvjetima  $\Phi_{prop}$ . Opći izraz dali su Lopez-Hernandez et al. (2004):

$$\beta = \frac{a}{k_f^b \Phi_{prop}^c} \quad (3.85)$$

gdje su  $a$ ,  $b$  i  $c$  bezdimenzijski parametri karakteristični za pojedinu korelaciju. Parametar  $c = 0$  u koliko faktor turbulencije zavisi jedino o propusnosti.



Tablica 1. Zavisnost propusnosti frakture  $k_f$  i faktora turbulencije  $\beta$  o efektivnom naprezanju frakture  $\sigma_{ff}$  za podupirač Econoprop (izvor CarboCeramics.com)

$\sigma_{ff}$ (bar)	$k_f$ (mD)		$\beta$ ( $m^{-1}$ )	
	20/40	30/50	20/40	30/50
137,9	340 000	220 000	24 318	35 464
275,8	300 000	180 000	29 384	40 530
413,7	230 000	140 000	43 570	50 663
551,6	150 000	90 000	75 994	81 060
689,5	85 000	65 000	130 709	151 988

Reynoldsov broj  $N_{Re}$  u poroznoj sredini određen je izrazom (Hurst, 1953):

$$N_{Re} = \frac{k_f \beta \rho v}{\mu} . \quad (3.86)$$

Uvrštenjem izraza (3.86) u izraz (3.83) dobiva se konačni izraz za efektivnu propusnost frakture,  $k_{f,ef}$ :

$$k_{f,ef} = \frac{k_f}{1 + N_{Re}} . \quad (3.87)$$

Kako bi kvantificirali oštećenja koje uzrokuju promjene propusnosti u frakturi zbog čepjenja međuprostora pakiranog podupirača ležišnim materijalom, eventualno razmrvljenim podupiračem i/ili ostacima neraspadnutim gelom, Flowers et al. (2003) predložili su tzv. princip preostale propusnosti (engl. *Retained Permeability*), gdje je preostala efektivna propusnost frakture jednaka:

$$k_{f,gel,ef} = k_f \times \frac{\% \text{ oštećenja}}{100} . \quad (3.88)$$

Temeljem rezultata istraživanja predložili su da se za polimerne fluide u proračunu konačne proizvodnosti bušotine postotak oštećenja uzima 50 % ili više. VES fluidi u smislu preostalog oštećenja imaju značajnu prednost pred polimerima budući da je postotak oštećenja minimalan.

U ovom je radu korišten model Penny & Jina (1995) gdje su autori dali obrazac kojim se efekt oštećenja uzrokovan ostacima gela izražava kroz tzv. modificirani faktor turbulencije  $\beta'$  :

$$\beta' = F \beta . \quad (3.89)$$

Faktor oštećenja  $F$  jednak je:

$$F = 10^{\frac{\% \text{ oštećenja}}{100}} \quad (3.90)$$

U nastavku je prikazan UFD postupak procjene bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti  $J_{fD}$ , koji uvažava sva eventualna odstupanja od idealnog modela protjecanja plina iz ležišta u frakturu, kroz frakturu i u pribušotinskoj zoni frakture. Postupak se provodi kroz sljedeće korake:

- 1) pretpostaviti, obično temeljem iskustva prije izvršenih radova i računalnih simulacija, masu podupirača koja će se utisnuti u ležište  $m_{prop}$ ,
- 2) izračunati drenažni volumen ležišta  $V_{drenažni}$  prema obrascu (3.58), odnosno volumen frakture  $V_{prop-2krila}$  (3.64),
- 3) pretpostaviti Reynoldsov broj  $N_{Re}$ , za početni uvjet  $N_{Re} = 0$  a za svaki idući  $N_{Re} = N_{Re,pretpostavljeni}$ ,
- 4) pomoću obrasca (3.83) izračunati efektivnu propusnost frakture,  $k_{f,ef}$ , za početni uvjet  $N_{Re} = 0 \Rightarrow k_{f,ef} = k_f$  a za svaki idući  $N_{Re} = N_{Re,pretpostavljeni} \Rightarrow k_{f,ef} = \frac{k_f}{1 + N_{Re,pretpostavljeni}}$ ,
- 5) uvrštenjem efektivne propusnost frakture  $k_{f,ef}$  u obrazac (3.63) izračunati broj podupirača  $N_{prop}$ ,
- 6) uvrštenjem broja podupirača  $N_{prop}$  u obrazac (3.65) izračunati maksimalno mogući bezdimenzijski indeks proizvodnosti  $J_{fD,max}$  te uvrštenjem u obrazac (3.66) izračunati odnosnu optimalnu bezdimenzijsku provodljivost frakture  $C_{fD,opt}$  ;

- 7) temeljem obrazaca (3.68) i (3.69) izračunati optimalnu geometriju frakture za uvjete promijenjene efektivne propusnosti frakture, odnosno korigiranu optimalnu poluduljinu frakture  $x_{f,opt}$  i optimalnu širinu frakture  $w_{opt}$ ,
- 8) izračunati moguća linearna odstupanja od idealnih uvjeta protjecanja plina iz ležišta u frakturu. Sukladno obrascu (3.72) izračunati kombinirani *skin* uslijed oštećenja lica frakture i oštećenja pribušotinske zone  $s_{ff,d}$  odnosno njegove moguće inačice prema obrascima (3.70) i (3.73),
- 9) izračunati moguća odstupanja zbog prigušenja frakture u području kontakta s bušotinom (pribušotinskoj zoni frakture) preko *skina* uslijed prigušenja frakture  $s_{ck,w}$  i/ili  $s_{ck,k}$  prema obrascima (3.74) i/ili (3.75),
- 10) temeljem obrasca (3.76) izračunati aktualni bezdimenzijski indeks proizvodnosti  $J_{fD}$  koji uvažava sva eventualna odstupanja od idealnog modela protjecanja plina iz ležišta u frakturu, kroz frakturu i u pribušotinskoj zoni frakture,
- 11) za pretpostavljeni dinamički tlak u bušotini  $p_{wf}$  izračunati protok plina prema obrascu:

$$q_{g,SC} = \frac{T_{SC}}{P_{SC}} \frac{\pi k_g h_{ef,g} \left[ m(\bar{p}_R) - m(p_{wf}) \right]}{T} J_{fD}, \quad (3.91)$$

- 12) izračunati linearnu brzinu plina u punoj visini frakture  $h_f$  prema obrascu:

$$v_{g,wf} = \frac{B_{g,wf} q_{g,SC}}{h_f w_{opt}}, \quad (3.92)$$

- 13) proračun fizikalnih svojstava fluida vrši se pri uvjetima dinamičkog tlaka u bušotini  $p_{wf}$  budući da je u tom segmentu veličina brzine najizraženija.

$$B_{g,wf} = \frac{P_{SC}}{T_{SC}} \frac{Z_{wf} T_R}{P_{wf}}, \quad (3.93)$$

$$\rho_{g,wf} = \frac{P_{wf} M_z \gamma_g}{Z_{wf} R T_R}, \quad (3.94)$$

- 14) sukladno obrascu (3.85) izračunati faktor turbulencije  $\beta$ , ili ga očitati iz tablica proizvođača podupirača uvažavajući pri tome vrijednost efektivnog naprezanja koje djeluje na podupirač frakture  $\sigma_{ff}$  prema obrascu (3.84),
- 15) izračunati faktor oštećenja  $F$  zbog oštećenja uzrokovanog eventualnim ostacima gela u frakturi sukladno obrascu (3.90),
- 16) izvršiti korekciju faktor turbulencije  $\beta$  kroz modificirani faktor turbulencije  $\beta'$  prema obrascu (3.89),
- 17) izračunati vrijednost novog Reynoldsova broja prema obrascu:

$$N_{Re,izračunati} = \frac{k_{f,ef} \beta' \rho_{g,wf} v_{g,wf}}{\mu_{g,wf}}, \quad (3.95)$$

- 18) izračunati vrijednost pogreške procjene Reynoldsova broja prema obrascu:

$$pogreška = \frac{|N_{Re,izračunati} - N_{Re,pretpostavljeni}|}{N_{Re,pretpostavljeni}} \times 100. \quad (3.96)$$

Ukoliko je  $pogreška < 0,01$  tada je procjena  $N_{Re}$  korektna, u suprotnom potrebno je vratiti se na točku 3) i pretpostaviti novi  $N_{Re,pretpostavljeni}$ . Postupak je iterativan i ponavlja se do ispunjenja uvjeta dozvoljene pogreške.

Izračunata geometrija frakture optimalna je samo u odnosu na jedan unaprijed određeni dinamički tlak u bušotini (na željenu proizvodnju). Razlog tome je zavisnost veličine broja podupirača o efektivnoj propusnosti ležišta koja se opet mijenja u zavisnosti o veličini protoka (brzini plina kroz frakturu). Budući da svaka promjena veličine broja podupirača određuje i odnosnu promjenu optimalne geometrije frakture potrebno je unaprijed odrediti koja je to željena proizvodnja. Jednom kada je sukladno prikazanoj proceduri određena optimalna geometrija frakture, postupak se u punom rasponu dinamičkih tlakova u bušotini ponavlja, ali ovaj puta za konstantne vrijednosti optimalne poluduljine frakture  $x_{f,opt}$  i optimalne širine frakture  $w_{opt}$ . Bezdimenzijsku provodljivost frakture tada se računa prema obrascu:

$$C_{fD} = \frac{k_{f,ef} w_{opt}}{k_g x_{f,opt}}. \quad (3.97)$$

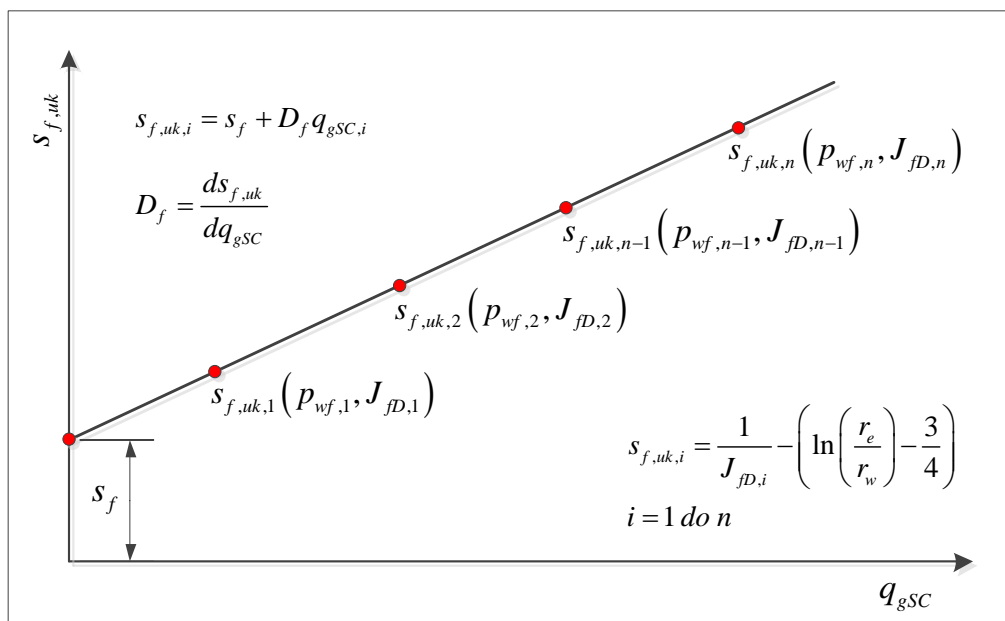
Bezdimenzijski indeks proizvodnosti  $J_{fD}$  nakon toga se računa sukladno obrascu (3.50), odnosno (3.76), a uz pomoć funkcije  $f(C_{fD})$  definirane obrascem (3.48). Na taj je način u potpunosti određena zakonitost protjecanja iz ležišta kroz frakturu u bušotinu (IPR krivulja).

Efekt frakturiranja ležišta procijenjen po UDF postupku uvodi se u standardni obrazac za proizvodnost ekvivalentne vertikalne plinske bušotine (3.39) kroz ekvivalentni ukupni *skin* uslijed frakturiranja  $s_{f,uk}$ . Izraz za  $s_{f,uk}$  dobiven je jednostavnim ponovnim aranžiranjem obrasca (3.50):

$$s_{f,uk} = \frac{1}{J_{fD}} - \left( \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} \right), \quad (3.98)$$

gdje je:

$$s_{f,uk} = s_f + D_f q_{gSC}. \quad (3.99)$$



Slika 15. Grafički prikaz određivanja ekvivalentnog linearnog *skina* uslijed frakturiranja  $s_f$  i ekvivalentnog efekta visokih brzina protjecanja fluida u frakturi  $D_f$ .

Vrijednosti pojedinih komponenti *skina*, ekvivalentnog linearnog *skina* uslijed frakturiranja  $s_f$  i ekvivalentnog efekta visokih brzina protjecanja fluida u frakturi  $D_f$  dobivaju se interpretacijom jednadžbe pravca (3.99) gdje vrijednost  $s_f$  predstavlja odsječak na osi y a vrijednost a  $D_f$  nagib pravca. Slika 15. zorno prikazuje taj proces.

### 3.1.11. Bezdimenzijski indeks proizvodnosti tanko proslojenih ležišta opremljenih tehnikom *Frac Pack*

Procjena proizvodnog potencijala nekonsolidiranih tanko proslojenih ležišta koja su opremljena tehnikom *FP* zasniva se na istim principima kao što je prikazano u poglavlju 3.1.9. Ležišta/bušotine opremljene ovom tehnikom može se interpretirati kao hidraulički frakturirana ležišta opremljena konvencionalnim pješčanom zasipom u zacjevljenom kanalu bušotine. Pri tome je podupirač frakture ujedno i medij pješčanog zasipa. Slika 16. prikazuje model pritjecanja plina iz tanko proslojenog ležišta u bušotinu opremljenu metodom *Frac Pack*. Kod tanko proslojenih ležišta praktično je nemoguće procijeniti geometriju frakture svakog pojedinog proslojka već se uzima jedinstvena vrijednost optimalne poluduljine frakture  $x_{f,opt}$  i optimalne širine frakture  $w_{opt}$ . Pri tome se u proračun uzima samo efektivno propusna debljina paketa  $h_{ef} = \sum_{i=1}^n h_i$  i jedinstvena vrijednost efektivne propusnosti ležišta  $k_{ef,g}$  sukladno obrascu:

$$k_{ef,g} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{g,i} h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}. \quad (3.100)$$

Proizvodnost cjelokupnog ležišta opremljenog tehnikom *FP* tada je jednaka:

$$q_{g,SC} = \frac{T_{SC}}{P_{SC}} \frac{\pi k_{ef,g} h_{ef,g} [m(\bar{p}_R) - m(p_{wf})]}{T} J_{D,FP}, \quad (3.101)$$

gdje je bezdimenzijski indeks proizvodnosti ležišta  $J_{D,FP}$  određen obrascem:

$$J_{D,FP} = \frac{1}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + (s_f + s_G + s_{GP}) + (D_f + D_G + D_{GP})q_{g,SC}}. \quad (3.102)$$

Vrijednosti pojedinih komponenti *skina*, ekvivalentnog linearnog *skina* uslijed frakturiranja  $s_f$  i ekvivalentnog efekta visokih brzina protjecanja fluida u frakturi  $D_f$  dobivaju se interpretacijom jednadžbe pravca (3.99) prema proceduri prezentiranoj u poglavlju 3.1.10.

Osim efekata kao što su posljedice frakturiranja ležišta, za ovaj tip opremanja karakteristični su efekti pješčanog zasipa. *Skin* uslijed linearnog protjecanja u perforacijama ispunjenih podupiračem  $s_G$  računa se prema obrascu:

$$s_G = \frac{8 k_{ef,g} h_{ef,g}}{k_G n_p D_p^2} L_p, \quad (3.103)$$

dok se ekvivalentni efekt visokih brzina protjecanja fluida u perforacijama  $D_G$  računa prema sljedećem obrascu:

$$D_G = \beta_G \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{32 k_{ef,g} h_{ef,g}}{n_p^2 D_p^4 \pi} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{1}{\bar{\mu}_g} L_p. \quad (3.104)$$

*Skin* uslijed linearnog protjecanja kroz sustav anularnog pješčanog zasipa  $s_{GP}$  računa se prema obrascu:

$$s_{GP} = \frac{k_{ef,g} h_{ef,g}}{k_{GP} h_{scr}} \left[ \ln \left( \frac{r_c}{r_{si}} \right) + \left( \frac{k_{GP}}{k_{scr}} - 1 \right) \ln \left( \frac{r_{so}}{r_{si}} \right) \right], \quad (3.105)$$

dok je ekvivalentni efekt visokih brzina protjecanja fluida u sustavu anularnog pješčanog zasipa  $D_{GP}$  jednak:

$$D_{GP} = \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{k_{ef,g} h_{ef,g}}{2 \pi h_{scr}^2 \bar{\mu}_g} \left[ \beta_{GP} \left( \frac{1}{r_{so}} - \frac{1}{r_c} \right) + \beta_{scr} \left( \frac{1}{r_{si}} - \frac{1}{r_{so}} \right) \right]. \quad (3.106)$$

Izvodi obrazaca (3.103), (3.104), (3.105) i (3.106) nalaze se u prilogu 2.

Izdašnost dotoka  $FE$  cjelokupnog ležišta opremljenog tehnikom FP tada je jednaka:

$$FE = \frac{k_{ef,g} h_{ef,g}}{\ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + (s_f + s_G + s_{GP}) + (D_f + D_G + D_{GP}) q_{g,SC}} \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{k_{g,i} h_i}{\ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - 0,75 + D_{R,i} q_{g,SC,i}}}. \quad (3.107)$$

Stimulacijski efekt, odnosno mjera relativnog povećanja indeksa proizvodnosti ležišta opremljenog tehnikom FP, u odnosu na tanko proslojeno ležište raskriveno perforiranjem proizvodne kolone zaštitnih cijevi, može se izraziti obrascem:

$$FOI = \frac{k_{ef,g} h_{ef,g} \left[ \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + (s_f + s_G + s_{GP}) + (D_f + D_G + D_{GP})q_{g,SC} \right]}{\sum_{i=1}^n \frac{k_{g,i} h_{g,i}}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0,75 + s_i + D_i q_{g,SC,i}}}. \quad (3.108)$$

Proizvodnost ležišta često se prikazuje i u kvadratnom obliku:

$$m(\bar{p}_R) - m(p_{wf}) = a q_g + b q_{g,SC}^2, \quad (3.109)$$

gdje je  $a$  član koji opisuje gubitak tlaka uslijed Darcyjeva laminarnog protoka jednak:

$$a = \frac{T}{\pi k_{ef,g} h_{ef,g}} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \left[ \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + (s_f + s_G + s_{GP}) \right], \quad (3.110)$$

a  $b$  član jednadžbe koji opisuje gubitak tlaka kao posljedice visokih brzina protoka plina ima oblik:

$$b = \frac{T}{\pi k_{ef,g} h_{ef,g}} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} (D_f + D_G + D_{GP}) q_{g,SC}, \quad (3.111)$$

gdje je rješenje kvadratne jednadžbe:

$$q_{g,SC} = \frac{\sqrt{a^2 + 4b [m(\bar{p}_R) - m(p_{wf})]} - a}{2b}. \quad (3.112)$$

Proizvodnost ležišta za tlakove manje od 140 bar-a može se prikazati i preko kvadrata tlakova:

$$\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2 = a q_g + b q_{g,SC}^2, \quad (3.113)$$

gdje je  $a$  član koji opisuje gubitak tlaka uslijed Darcyjeva laminarnog protoka jednak:

$$a = \frac{T \bar{\mu}_g \bar{Z}}{\pi k_{ef,g} h_{ef,g}} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \left[ \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + (s_f + s_G + s_{GP}) \right], \quad (3.114)$$

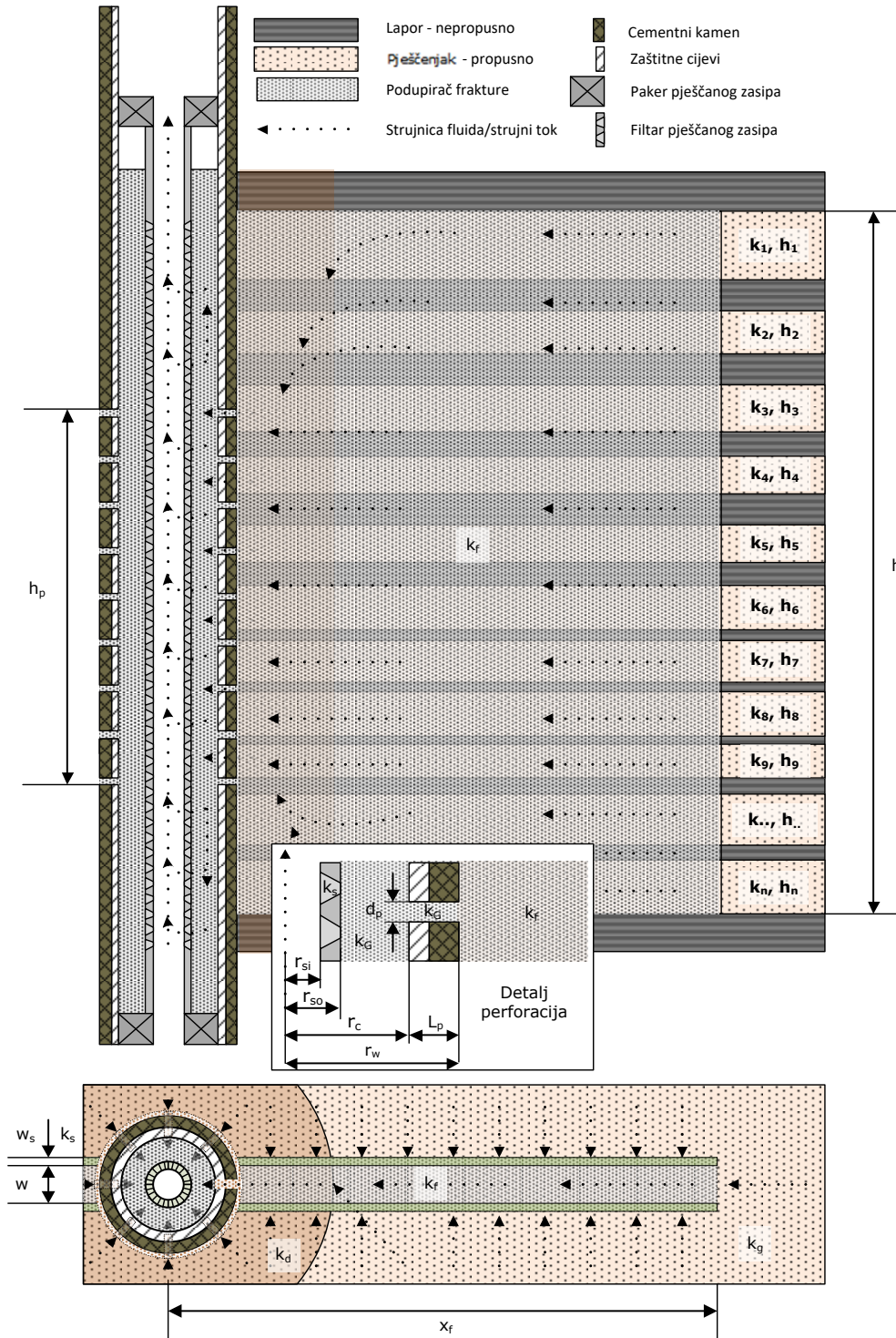
a  $b$  član jednadžbe koji opisuje gubitak tlaka kao posljedice visokih brzina protoka plina ima oblik:

$$b = \frac{T \bar{\mu}_g \bar{Z}}{\pi k_{ef,g} h_{ef,g}} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} (D_f + D_G + D_{GP}) q_{g,SC}, \quad (3.115)$$



gdje je rješenje kvadratne jednadžbe:

$$q_{g,SC} = \frac{\sqrt{a^2 + 4b(\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2)} - a}{2b} \quad (3.116)$$



Slika 16. Model pritjecanja plina iz tanko proslojenog ležišta u bušotinu opremljenu tehnikom FP.

### 3.2. Odabrana poglavlja iz teorije hidrauličkog frakturiranja

Hidrauličko frakturiranje je postupak kojim se u ležištima nafte i plina stvara visoko protočna pukotina poduprta propusnim podupiračem s ciljem poboljšanja njihove prirodne proizvodnosti. Efekt poboljšanja proizvodnosti ili kako se vrlo često govori, stimulacije, uzrokovan je povećanjem kontaktne površine između bušotine i ležišta. Proizvodnost hidraulički frakturiranog ležišta određena je bezdimenzijskom provodljivosti frakture koja u svojoj osnovi predstavlja mjeru relativne sposobnosti frakture da provodi fluide u bušotinu u odnosu na sposobnost ležišta da napaja tu frakturu. *UFD* postupak, kako je detaljno opisano u poglavlju 3.1.10, pokazao je da za neku masu podupirača utisnutu u propusni dio ležišta postoji jedinstvena optimalna bezdimenzijska vodljivost frakture  $C_{fD,opt}$ , koja ekskluzivno određuje optimalnu geometriju frakture, odnosno njenu poluduljinu  $x_{f,opt}$  i širinu  $w_{opt}$ . Visina frakture  $h_f$ , u kombinaciji s optimalnom duljinom i širinom određuje optimalnu geometriju frakture (volumen frakture i masu podupirača). Simulacija nastajanja hidrauličke frakture, odnosno matematičko definiranje tog procesa je kompleksan problem koji zahtjeva istodobno rješavanje jednadžbi elastičnosti, jednadžbi protjecanja frakturom i zadovoljavanje kriterija napredovanja frakture (Kevrić, 1999). Trodimenzionalna simulacija hidrauličkog frakturiranja, koja je korištena u ovom radu, zasniva se na numeričkim metodama rješavanja matematičkih međuodnosa spomenutih procesa.

U ovom su poglavlju obrađene temeljne zakonitosti na kojima počiva proces hidrauličkog frakturiranja s naglaskom na slučaj tanko proslojenih ležišta.

#### 3.2.1. Temeljne zakonitosti mehanike stijena i geometrije frakture

Pri razmatranju stanja naprezanja u naslagama stijena razlikujemo primarno i sekundarno stanje naprezanja. Primarnim stanjem naprezanja smatra se naprezanje koje je u tlu postojalo prije izrade kanala bušotine. Izradom kanala bušotine ili drugih otvora u tlu, stijene u okolini otvora prelaze iz primarnog u sekundarno, izmijenjeno stanje naprezanja. Stanje naprezanja u stijenama funkcija je međusobnog utjecaja ležišnih svojstava, tektonike i procesa nastanka stijena, gdje se u obzir trebaju uzeti promjene svojstava stijena s dubinom, temperaturom i vremenom (Kevrić, 1999).

Osnovna pretpostavka na kojoj se temelji teorija hidrauličkog frakturiranja je da se stijena ponaša poput linearno elastičnog materijala. Na temelju te pretpostavke ponašanje stijene može se opisati matematičkim izrazima u funkciji njezinih mehaničkih svojstva:

Youngova modula elastičnosti, Poissonov omjera, posmičnog modula, volumnog modula i žilavosti stijene. Navedena mehanička svojstva, osim žilavosti stijene, mogu se međusobno izraziti kao funkcija druga dva, tako da je dovoljno poznavanje dva mehanička svojstva. Kod hidrauličkog frakturiranja gotovo redovito su to Youngov modul elastičnosti i Poissonov omjer. Ove relacije valjane su uz pretpostavku da je stijena homogen, izotropan i elastičan materijal. Youngov modul elastičnosti,  $E$ , za linearno elastične materijale, po svojoj je definiciji konstanta proporcionalnosti između normalnog naprezanja  $\sigma$ , i deformacije u smjeru tog naprezanja,  $\varepsilon$ :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (3.117)$$

Youngovim modulom elastičnosti opisano je svojstvo podložnosti materijala deformiranju pod utjecajem vanjske sile. Poissonov omjer,  $\nu$ , definiran je kao apsolutna vrijednost omjera poprečne i uzdužne deformacije:

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_{\text{popr.}}}{\varepsilon} \right|. \quad (3.118)$$

Posmični modul,  $G$ , konstanta je proporcionalnosti između tangencijalnog naprezanja,  $\tau$ , i tangencijalne deformacije,  $\gamma$ :

$$G = \frac{\tau}{\gamma}. \quad (3.119)$$

Prostorno gledajući, definirana je i relativna promjena volumena tijela,  $\varepsilon_v$ :

$$\varepsilon_v = -\frac{1-2\nu}{E} p = -\frac{p}{K}, \quad (3.120)$$

gdje je  $K$  volumenski modul elastičnosti.

Žilavost materijala ili kritična vrijednost intenziteta naprezanja,  $K_{IC}$ , svojstvo je materijala kojim se izražava otpornost materijala napredovanju pukotine. Intenzitet naprezanja,  $K_I$ , funkcija je naprezanja,  $\sigma$ , kojem je izložena pukotina poluduljine,  $x_f$ :

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi x_f}. \quad (3.121)$$

Kad vlačno naprezanje ili vlačna deformacija pri vrhu pukotine dosegnu kritičnu vrijednost  $K_{IC}$ , pukotina će se produljiti. Linearno elastična mehanika frakture (LEMF) stanje

naprezanja u okolini frakture izvodi na osnovu teorije linearne elastičnosti. Iz toga slijedi da će pukotina napredovati pri kritičnom naprezanju,  $\sigma_{krit.}$ , koje je funkcija kritičnog intenziteta naprezanja:

$$\sigma_{krit.} = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi x_f}}. \quad (3.122)$$

Intenzitet naprezanja pri vrhu pukotine u funkciji nejednakog tlaka duž pukotine može se odrediti izrazom (Paris & Sih, 1966),

$$K_I = \frac{1}{\sqrt{\pi x_f}} \int_{-x_f}^{x_f} p_{net}(x) \sqrt{\frac{x_f + x}{x_f - x}} dx. \quad (3.123)$$

Poznajući raspodjelu efektivnog tlaka duž pukotine (razlika tlaka fluida u frakturi i minimalne komponente naprezanja), uz kritični intenzitet naprezanja, određena je duljina pukotine, dok je širina pukotine funkcija raspodjele tlaka u frakturi.

Obrazac (3.123) vrijedi i za izračun visine frakture. Problem točne procjene rasta po visini naročito je izražen kod tanko proslojenih ležišta. Mnoštvo faktora utječe na razvoj frakture u višezonalnim formacijama, ali generalno najviše utječe minimalno horizontalno naprezanje, slaba veza među proslojcima, žilavost, koeficijent filtracije i geomehanička svojstva, Youngov modul elastičnosti, Poissonov omjer, posmični modul (Liu & Valko, 2018). Naprezanje je pri tome prepoznato kao najvažniji faktor. Što je veća vrijednost minimalnog horizontalnog naprezanja, to je manja visina frakture. Do sada je razvijeno nekoliko matematičkih modela različitih autora koji se baziraju na obrascu (3.123), Economides et al. (2012), Fung et al. (1987), Mack & Warpinski (2000), Weng et al. (2011). Ovi modeli limitirani su brojem proslojaka.

Liu & Valko (2018) prezentirali su model rasta frakture za bilo koji broj proslojaka koji je uključio i efekte hidrostatskog tlaka radnog fluida na distribuciju efektivnog tlaka u frakturi. Efektivni tlak  $P_{net}(x)$  na dubini  $x$  u proslojku  $i$  određen je izrazom:

$$p_{net}(x) = \rho g x + P_{mid} - \sigma_i = \rho g x + [p_{ref} + \rho g (d_{mid} - d_{ref})] - \sigma_i = mx + b_i. \quad (3.124).$$

Autori su sukladno obrascu (3.123) definirali intenzitet naprezanja u krovinskom vrhu frakture  $K_{I+}$ , odnosno u podinskom vrhu frakture  $K_{I-}$ :

$$K_{I+} = \frac{1}{\sqrt{\pi c}} \int_{-c}^c p_{net}(x) \sqrt{\frac{c+x}{c-x}} dx = \frac{1}{\sqrt{\pi c}} \int_{-c}^c (mx + b_i) \sqrt{\frac{c+x}{c-x}} dx, \quad (3.125)$$

$$K_{I-} = \frac{1}{\sqrt{\pi c}} \int_{-c}^c p_{net}(x) \sqrt{\frac{c-x}{c+x}} dx = \frac{1}{\sqrt{\pi c}} \int_{-c}^c (-my + b_i) \sqrt{\frac{c+y}{c-y}} dy. \quad (3.126).$$

U izrazu (3.126) je  $y = -x$ , a  $-c$  dno frakture. Intenzitet naprezanja na dnu frakture će biti:

$$K_{I+} = \sum_{i=1}^n K_{I+,i}, \quad (3.127)$$

odnosno u vrhu frakture:

$$K_{I-} = \sum_{i=1}^n K_{I-,i}. \quad (3.128)$$

Efektivni tlak kod kojeg je zadovoljen uvjet da je  $K_{I+/-} = K_{IC,i}$  zove se ravnotežni i njime je određena ravnotežna visina frakture *tipu* i/ili *tipd* za kritične vrijednosti naprezanja u frakturi.

Ovdje su:

$b_i$  - odsječak na osi  $y$  i-tog proslojka jednadžbe (3.124),  $Pa$  ;

$c$  - poluvisina frakture, (-) znači u smjeru vrha frakture,  $m$  ;

$d_{mid}$  - dubina sredine frakture,  $m$  ;

$d_{ref}$  - referentna dubina u bušotini (sredina perforacija),  $m$  ;

$h_i$  - debljina i-tog proslojka,  $m$  ;

$K_{IC,i}$  - kritični intenzitet naprezanja ili žilavost i-tog proslojka,  $Pa\sqrt{m}$  ;

$K_{I-}, K_{I+}$  -intenzitet naprezanja u krovinskom odnosno podinskom vrhu frakture,  $Pa\sqrt{m}$

;

$m$  - hidrostatski gradijent,  $Pa m^{-1}$  ;

$p_{mid}$  - tlak na dubini sredine frakture,  $Pa$  ;

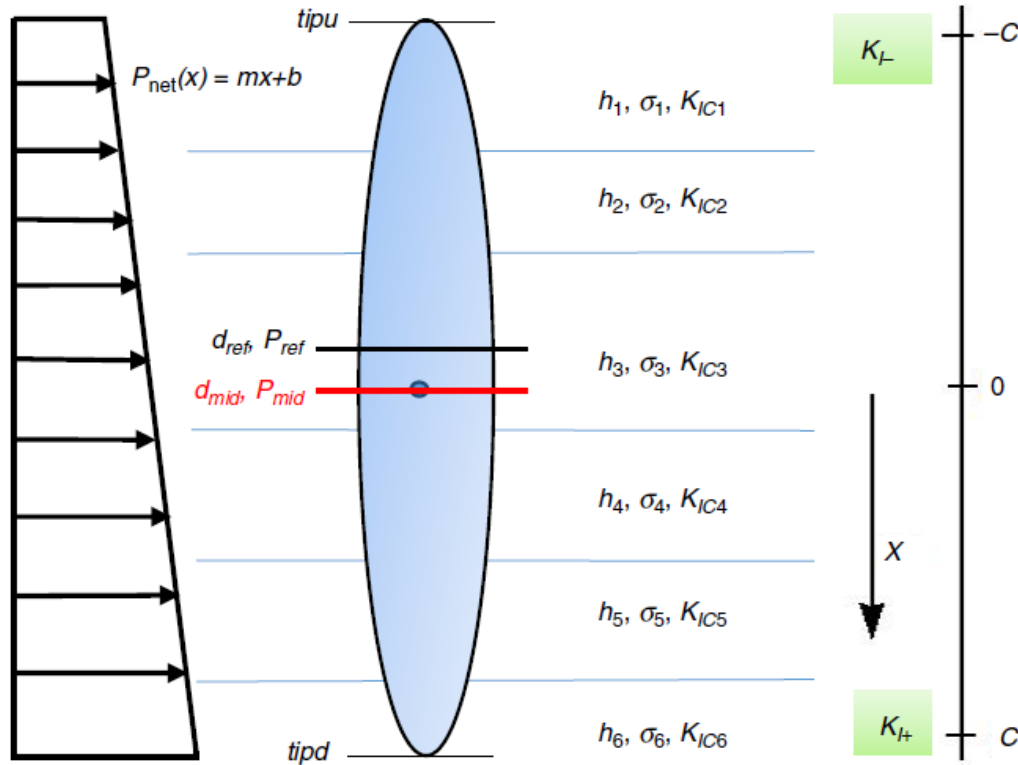
$p_{net}$  - efektivni tlak,  $Pa$  ;

$p_{ref}$  - tlak na referentnoj dubini bušotine (sredine perforacija),  $Pa$  ;

*tipu*, *tipd* - dubina krovinskog, odnosno podinskog vrha frakture,  $Pa$  ;

$x$  - koordinata dubine, nulta točka nalazi se u centru frakture,  $m$  ;

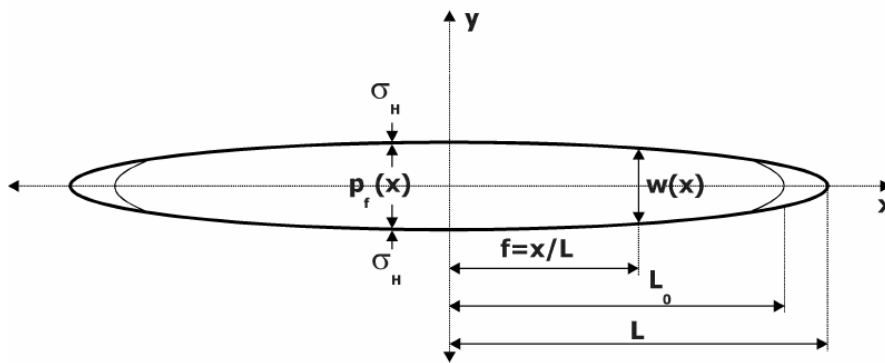
$\rho$  - gustoća fluida,  $\frac{kg}{m^3}$  ;



Slika 17. Originalni shematski prikaz modela frakture u višezonalnom ležištu s hidrostatskim tlakom u frakturi, preuzeto od Liu & Valko (2018).

Širina frakture funkcija je efektivnog napreznja frakture i elastičnih svojstava kojim se opisuje deformabilnost stijene. Što je veće napreznje stijena, za isti tlak fluida u frakturi i kod konstantnog modula elastičnosti i Poissonovog omjera, širina frakture je manja. Kontrasti napreznja između kolektora i stijena krovine i podine, indirektno utječu na širinu pukotine. U koliko su odnosi napreznja u podini, krovini i ležištu takvi, da uslijed povećanog napreznja u pokrovnim i podinskim stijenama sprječavaju vertikalno napredovanje pukotine, onda u pukotini može egzistirati veći tlak pa je i širina frakture veća (Kevrić, 1999). Kod tanko proslojenih ležišta gdje ovakva jasna granica ne postoji, uvjet postizanja veće širine frakture je nužno i njen rast u visinu. Slika 18. prikazuje model hidrauličke pukotine eliptičnog oblika. Za slučaj jednoliko raspoređenog tlaka u pukotini i homogenog napreznja u stijeni, odnosno u statičkim uvjetima, jednadžba za širinu pukotine ima oblik:

$$w(x) = \frac{2(1-\nu)L p_{net}}{G} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{L}\right)^2}. \quad (3.129)$$



Slika 18. Model hidrauličke pukotine eliptičnog oblika, preuzeto iz Kevrić (1999).

### 3.2.2. Gubitci i efikasnost radnog fluida

Gubitak fluida iz pukotine u ležište za vrijeme frakturiranja kontroliraju tri zone: zona filtarskog obloga (ako postoji), zona ispunjena filtratom i zona ispunjenom ležišnim fluidom. Budući da je brzina protjecanja kroz pojedinu zonu definirana kao omjer koeficijenta gubitka fluida pripadne zone i drugog korijena vremena protjecanja, gubitak fluida za vrijeme frakturiranja je karakteriziran s tri koeficijenta:

- koeficijentom filtracije fluida,  $C_c$ , koji je kontroliran propusnošću ležišta,  $k$ , šupljikavošću,  $\Phi$ , ukupnim koeficijentom stlačivosti,  $c_t$  i viskoznošću ležišnog fluida,  $\mu$ :

$$C_c = \Delta p \sqrt{\frac{k\Phi c_t}{\pi\mu}}, \quad (3.130)$$

- koeficijentom filtracije fluida,  $C_v$ , koji je kontroliran efektivnom propusnosti ležišta za filtrat,  $k_e$ , šupljikavošću,  $\Phi$  i prividnom viskoznošću filtrata,  $\mu_a$ ,

$$C_v = \sqrt{\frac{k_e \Delta p \Phi}{2\mu_a}}, \quad (3.131)$$

- koeficijentom filtracije fluida,  $C_w$ , koji je kontroliran propusnošću filtarskog obloga,  $k_w$ , i prividnom viskoznošću filtrata,  $\mu_a$ ,

$$C_w = \sqrt{\frac{k_w \Delta p \kappa}{2\mu_a}}, \quad (3.132)$$

gdje je  $\kappa$ , bezdimenzionalna konstanta koja se određuje eksperimentalno, a ovisi o koncentraciji krutih čestica u fluidu za frakturiranje. Koeficijent filtracije  $C_w$ , se određuje eksperimentalno za određenu vrstu fluida, te za vrstu i koncentraciju dodanih krutih čestica (Kevrić, 1999). Kako je protjecanje kroz zone koje kontroliraju gubitak fluida međusobno povezano, definiran je jedinstveni efektivni koeficijent filtracije,  $C$ :

$$C = \frac{2C_c C_v C_w}{C_c C_w + [C_v^2 C_w^2 + 4C_c^2 (C_v^2 + C_w^2)]^{1/2}}, \quad (3.133)$$

Za slučaj proslojenih ležišta, različitih debljina i propusnosti, uvodi se srednji efektivni koeficijent filtracije,  $\bar{C}$ :

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i h_i)}{(h_i)}. \quad (3.134)$$

Srednji efektivni koeficijent filtracije određuje se uz pomoć injekcijskog testa (engl. *Mini-Frac Test*) u fazi kalibracije (redizajna) modela hidrauličkog frakturiranja.

Srednja brzina filtracije,  $\bar{v}_{filtracije}$ , se može izraziti u funkciji srednjeg efektivnog koeficijenta filtracije,  $\bar{C}$  i vremena,  $t$ , odnosno izrazom:

$$\bar{v}_{filtracije} = \frac{\bar{C}}{\sqrt{t}} = \frac{q_{filtracije}}{A_{filtracije}}. \quad (3.135)$$

Volumen izgubljenog fluida u ležištu jednak je:

$$V_{gubitaka} = \frac{q_{filtracije}}{t}, \quad (3.136)$$

dok je efikasnost fluida za frakturiranje,  $\eta$ , definirana kao omjer volumena frakture (ili razlike utisnutog volumena i gubitaka) i utisnutog volumena fluida:

$$\eta = \frac{V_f}{qt} = \frac{qt - V_{gubitaka}}{qt}. \quad (3.137)$$



### 3.2.3. Matematički modeli za projektiranje hidrauličke frakture

Geometrija frakture definirana je jednadžbama elastičnosti, kriterijem napredovanja frakture i gradijentom tlaka fluida u frakturi. Za praktičnu primjenu razvijeni su dvodimenzionalni i trodimenzionalni modeli. Dvodimenzionalni modeli temelje se na pretpostavci ravninskog stanja deformacija. To znači da je u linearno elastičnim neograničenim stijenama u svim paralelnim ravninama deformacija neovisna o deformacijama u susjednim ravninama (Kevrić 1999). Osnovni dvodimenzionalni modeli su PKN (Perkins-Kern-Nordgen, 1961), KGD (Kristijanović-Geertsma-de Klerk, 1955) i radijalni model.

Za razliku od 2D modela, gdje je u izvodu matematičkih rješenja geometrije frakture pretpostavljena konstantna visina frakture i zanemaren vertikalni protok fluida, 3D modeli dozvoljavaju promjenu visine frakture s njenom duljinom i uzimaju u obzir vertikalni protok fluida. Prema tome, daju realniju geometriju frakture, distribuciju podupirača i ponašanje tlaka. U ovom radu korišten je 3D model firme Baker Hughes - MFrac.

## **4. ODREĐIVANJE PROIZVODNOG POTENCIJALA BUŠOTINA U HIDRAULIČKI FRAKTURIRANIM TANKO PROSLOJENIM LEŽIŠTIMA PLINA**

U ovom poglavlju provedeno je istraživanje proizvodnog potencijala ležišta PLQ-F u bušotinama SJ – 1 Dir i SJ – 2 Dir lokaliteta Sjeverni Jadran. Prikazana je nova metoda koja interaktivno povezuje 3D numeričku simulaciju formiranja geometrije frakture i postupak određivanja optimalne geometrije frakture prema konvencionalnoj *UFD* proceduri. Svrha istraživanja u bušotini SJ – 2 Dir bila je utvrditi maksimalno mogući dobitak u proizvodnosti za slučaj da je ležište hidraulički frakturirano prema programu koji se temelji na novoj metodi. U bušotini SJ – 1 Dir svrha istraživanja je bila utvrditi najveći mogući dobitak u proizvodnosti ležišta opremljenog tehnikom FP u odnosu na konvencionalno perforirano ležište. Cilj provedenih istraživanja bio je izraditi optimalni program hidrauličkog frakturiranja koji će rezultirati maksimalno mogućim indeksom proizvodnosti u oba slučaja.

### **4.1. Hidrauličko frakturiranje i proizvodno opremanje bušotina u tanko proslojenim ležištima plina lokaliteta Sjeverni Jadran**

Tanko proslojena ležišta mogu se litološki smatrati kao naizmjenični slijed vrlo tankih proslojaka šejla, silta i pijeska. Svaki proslojak iste litologije po svojim je geomehaničkim i proizvodnim karakteristikama sličan i bez naglih promjena u svojim svojstvima. Jasne granice ležišta ne postoje već se prije može govoriti o zonama (arbitrarno nazvanim ležištima) koje mogu biti uglavnom propusne, dominantno zasićene plinom i onima koje su dominantno zasićene slojnom vodom i na kraju uglavnom nepropusne zone. Karakterizira ih relativno mala do srednja propusnost gdje su pješčane zone često nekonsolidirane tako da je za proizvodnju potrebna primjena nekih od tehnika kontrole nekonsolidiranog ležišnog materijala. Na lokalitetu Sjeverni Jadran u takvim se slučajevima koriste slijedeće dvije tehnike (INA, 2013):

- FP (engl. „*Frac Pack*“) - tehnika koja kombinira izvođenje kontroliranih, kratkih i relativno širokih fraktura visokih propusnosti u srednje i visoko propusnim nekonsolidiranim ležištima i istovremenog izvođenja pješčanog zasipa. Pijesak podupirač (engl. *Proppant*) istovremeno je i pijesak pješčanog zasipa. Kao radni fluid – fluid nositelj podupirača koristi se vodeno bazna viskozno-elastična površinsko aktivna tvar ili vodeno bazni viskozno-elastični biopolimer,

- HRWP (engl. *High Rate Water Pack*) – tehnika izvođenja pješčanog zasipa gdje se kao radni fluid koristi neka od vodenih otopina soli. Pijesak se protiskuje i smješta u perforacije i u prstenasti prostor (filtrar – zaštitne cijevi) pri relativno niskim koncentracijama, ali pri relativno visokim protocima i tlaku ispod tlaka frakturiranja.

Glavni kriterij odabira tehnike zasniva se na principu: primijeniti tehniku *FP* gdje nema opasnosti od prodora podinske vode unutar ležišta, ili pak od prodora frakture van ležišta u potencijalno neželjene zone (druga ležišta zasićena vodom ili ona zasićena plinom koja se žele zasebno proizvodno opremiti); u ostalim slučajevima primijeniti tehniku HRWP (INA, 2013).

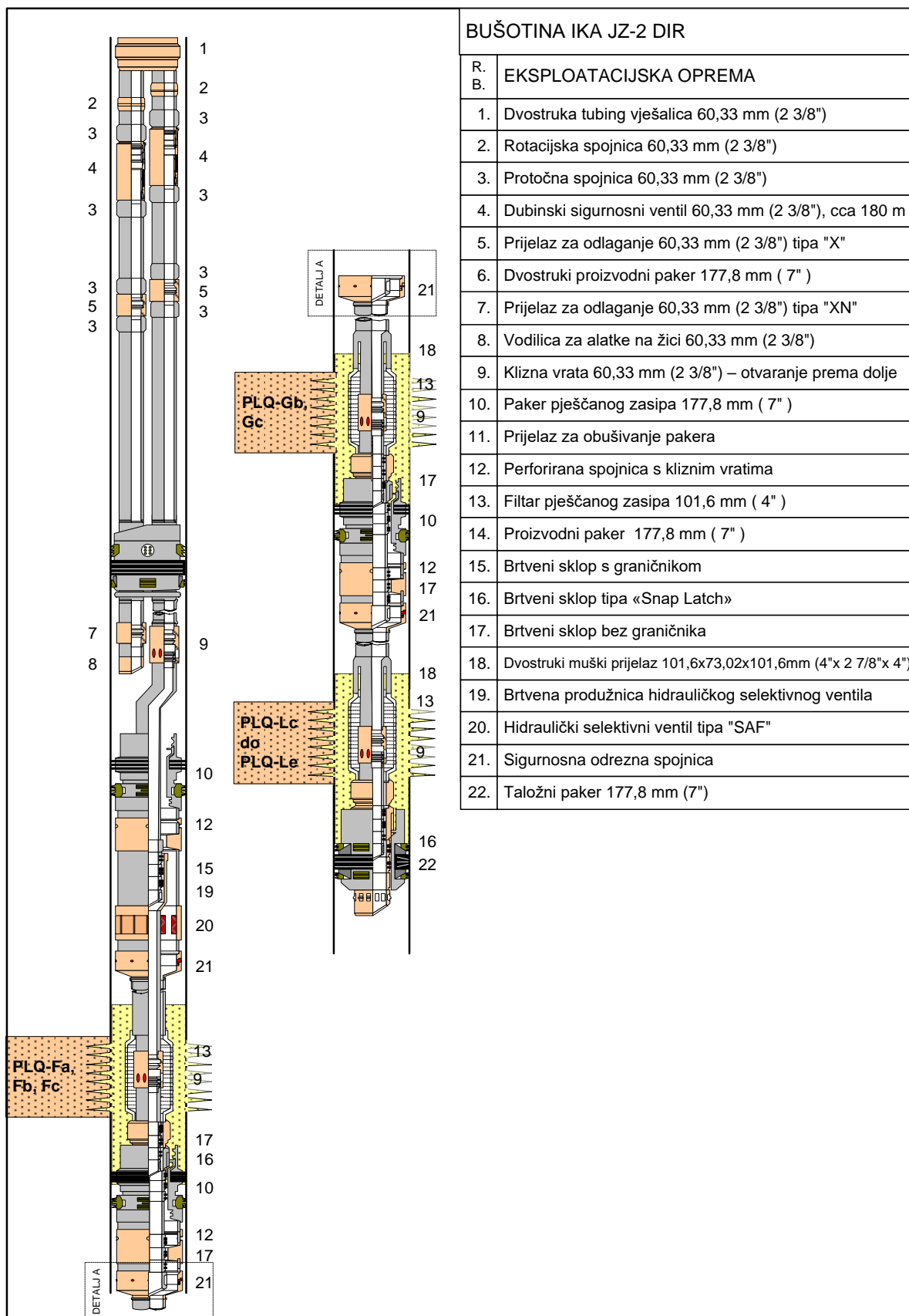
Tipičan projekt hidrauličkog frakturiranja (FP) uključuje sva tri karakteristična koraka: test uz više obroka utiskivanja (engl. *Step Rate Test*), injekcijski test mini-hidrauličkog frakturiranja (engl. *Mini-Frac Test*) i sam projekt hidrauličkog frakturiranja. Utisnuta koncentracija podupirača (propanta) kreće se u rasponu od 750 – 1 000 kg/m (504 – 672 lbm/ft) vertikalne visine ležišta (INA 2013). Pri tome je naglasak da ostvarena geometrija ide u korist što šire frakture u odnosu na njenu duljinu. Za postizanje ovih ciljeva potreban je tzv. dizajn kontroliranog sprečavanja rasta frakture kao posljedice zapunjenja njenog vrha podupiračem (engl. *Tip Screen Out - TSO*). Prema tome dizajnu proces hidrauličkog frakturiranja odvija se u dvije faze. U prvoj fazi generira se fraktura traženih dimenzija pomoću radnog fluida bez podupirača – prethodnice (engl. *PAD*). Proces se dizajnira tako da će u trenutku stvaranja frakture željenih dimenzija doći do kontroliranog sprječavanja njenog rasta u duljinu, i po visini u oba smjera, prema gore i prema dolje. Ovaj dizajn je moguć uz adekvatno programiranje simultanog relativno visokog gubitka radnog fluida u formaciju i odnosnog zapunjenja vrha stvorene frakture podupiračem kao prvom fazom. Po zapunjenju vrha frakture i sprječavanja njenog daljnjeg napredovanja u oba smjera, u drugoj fazi dolazi do „napuhavanja“ frakture, kontrolirano, ostvarenim tlakom iznad tlaka zatvaranja frakture tzv. efektivnim tlakom (engl. *Net Pressure*). Istovremeno se vrši zapunjenje frakture podupiračem od njenog vrha u smjeru kanala bušotine uz dehidraciju radnog fluida u ležište. Pri tome treba težiti prema optimalnim koncentracijama podupirača (propanta) s ciljem postizanja maksimalno mogućih indeksa proizvodnosti. Kao radni fluid koristi se vodena otopina viskozno-elastične površinsko aktivne tvari (engl. *VES*) viskoznosti 18-24 mPa s. Za podupirač frakture najčešće je korišten sintetizirani pijesak srednje veličine, promjera zrna 445 μm (engl. *30-50 US Mesh Size Range*) koji je ujedno i filtracijski medij pješčanog zasipa. Vrijednosti efikasnosti radnog fluida kreću se uglavnom ispod 40% (željeno visok gubitak fluida u formaciju radi postizanja TSO), pri koncentracijama podupirača u suspenziji i većim od 958,6 kg dodanog podupirača na 1 m<sup>3</sup>

radnog fluida (8 PPA, engl. *Pounds Per Gallon Added* – funti dodanog podupirača na galon fluida nositelja) te ostvarenim protocima preko 1,272 m<sup>3</sup>/min (8 bbl/min) fluida. Standardno se u bušotine ugrađuju i prepakirani filtri tipa „*Premium Slim Pack*“ nominalnog promjera 101,6 mm (4“) otvora 0,2032 mm (*gauge* 8 ili 0,008“) kod kojega je prostor između dvije žičane košuljice ispunjen pijeskom vezanim smolom srednje veličine promjera zrna 335 μm (40-60 *US Mesh Size Range*). Ova kombinacija podupirača i filtra pješčanog zasipa standardna je kada se primjenjuje tehnika *FP* na projektima lokaliteta Sjeverni Jadran.

Bušotine lokaliteta Sjeverni Jadran opremljene su tipski, uvažavajući sve sigurnosne zahtjeve koje moraju zadovoljiti u cilju nesmetanog odvijanja proizvodnje tijekom cjelokupnog proizvodnog vijeka polja. Bušotine su opremljene dvostrukim nizom uzlaznih cijevi, tubinga (engl. *Dual Completion*) i selektivnim opremanjem pojedinih ležišta. Sva otvorena ležišta opremljena su tehnikom *FP* ili *HRWP* s mogućnošću selektivnog otvaranja i zatvaranja proizvodnje kroz zajednički dugi niz, te proizvodnju iz jednog ležišta zasebno kroz kratki niz. Slika 19. daje prikaz tipske dvostruko proizvodno opremljene bušotine na lokalitetu Sjeverni Jadran.

Budući da je kod tanko proslojenih ležišta *FP* dominantno prisutna tehnika, osobitu važnost potrebno je posvetiti optimalizaciji u svim fazama procesa, od projektiranja, izvođenja, pa do naučenih lekcija naročito. Numeričkom simulacijom hidrauličkog frakturiranja mogu se odrediti dimenzije frakture, utrošeno vrijeme i materijal te bezdimenzijsku provodljivost frakture. Bezdimenzijska provodljivost frakture zajedno s visinom i duljinom frakture ulazne su varijable za Nodal analizu proizvodnosti bušotine. Kombinacijom simulacijskih rezultata i proračuna metodom Nodal analize moguće je izraditi se tzv. statički model ležište-bušotina-proizvodni sustav koji se odnosi na jednu točku u vremenu.

Statički model potrebno je izraditi u sve tri faze, u fazi dizajna, fazi redizajna (poslije testa više uvjeta protoka i injekcionog testa), te na kraju u fazi usklađivanja efektivnog tlaka u simulatoru frakturiranja (engl. *Pressure matching*) nakon izvršene operacije hidrauličkog frakturiranja. Provedena istraživanja u ovom se radu temelje na statičkom modelu.



Slika 19. Tipska dvostruka proizvodna oprema bušotina na lokalitetu Sjeverni Jadran, preuzeto iz INA (2014).

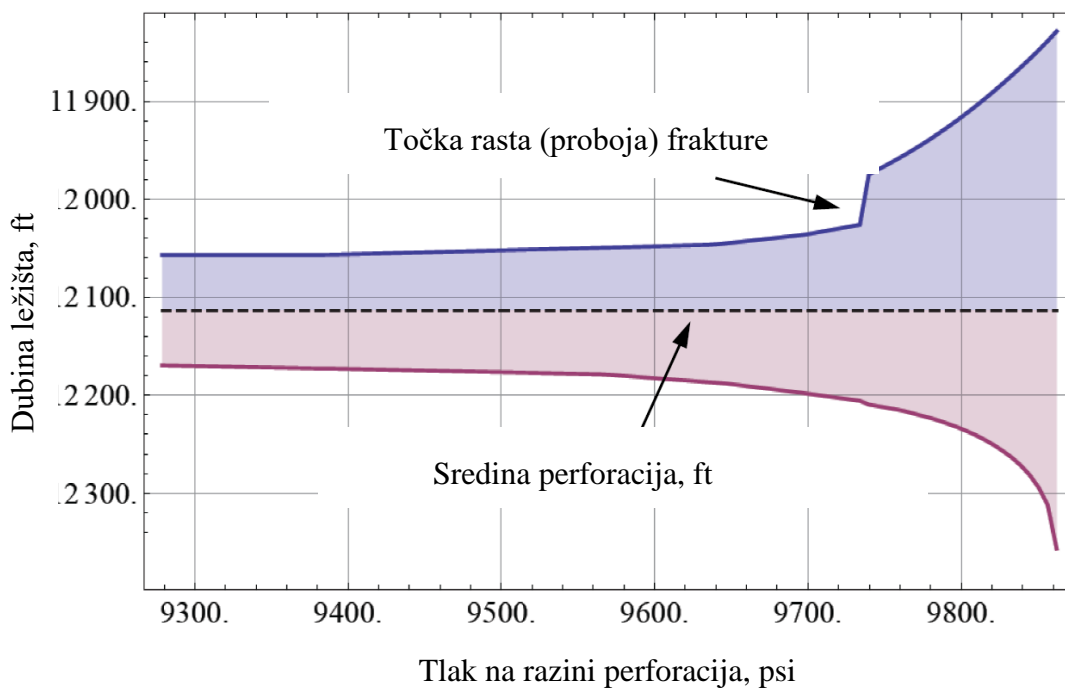
## 4.2. Metodologija provedenih istraživanja

Za potrebe ovog istraživanja i specifičnosti uvjetovanih tanko proslojenim ležištima razvijena je metoda koja će funkcionalno povezati proces hidrauličkog frakturiranja s maksimalno mogućim indeksom proizvodnosti. Pri tome se vodilo računa da mora biti univerzalno primjenjiva za procjenu proizvodnog potencijala bilo kojeg tanko proslojenog ležišta na lokalitetu Sjeverni Jadran.

Teoretski je moguće pomoću *UFD* postupka odrediti optimalnu geometriju frakture (optimalnu bezdimenzijsku provodljivost frakture) koja će za određenu masu utisnutog podupirača dati maksimalno mogući indeks proizvodnosti. Kod hidrauličkog frakturiranja konvencionalnih ležišta, zbog obično jasno definiranih granica (litološke sličnosti i njihovih debljina te značajne razlike u minimalnom naprezanju krovine, podine i ležišta), visina frakture, a time i masa podupirača su poznati. Kod određivanja indeksa proizvodnosti prvo se odredi visina frakture i za tu se visinu pretpostavi masa podupirača. Iz mase podupirača se posredno, preko broja podupirača, određuje optimalna širina i poluduljina frakture. Takav pristup predstavlja konvencionalni pristup i uvodno je prikazan u poglavlju 4.3 na primjeru ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

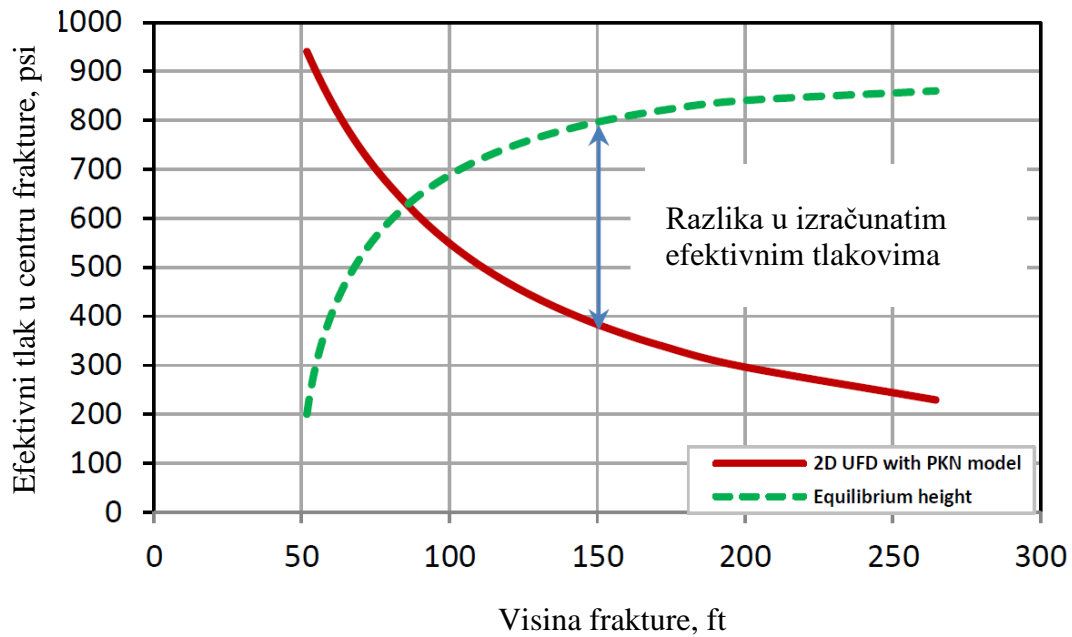
Kod tanko proslojenih ležišta, prvenstveno zbog paralelnog rasta frakture kako u duljinu tako i u visinu to nije slučaj. Pri tome treba voditi računa o ograničenjima koja mogu biti uvjetovana ležištem, najčešće su to zone zasićenja slojnom vodom koje se ne smiju tretirati. Ograničenja mogu biti uvjetovana i raspoloživom opremom za frakturiranje, kao što su snaga i kapacitet pumpnih agregata ili rezervoarskog prostora.

Do sada je problem rasta frakture i njegova utjecaja na određivanje optimalne geometrije frakture u višezonalnim ležištima istraživalo nekoliko autora. Pitakbunkate et al. (2011) uveli su iterativni postupak gdje je za višeslojna ležišta visina frakture stavljena u funkcionalnu zavisnost efektivnog tlaka frakture. Procedura se sastoji od formiranja dvije krivulje visina frakture. Jedna je temeljena na principima linearno elastične mehanike frakture (LEMF), tzv. „krivulja ravnotežnih visina frakture“ (engl. „*Equilibrium Height Curve*“). Napredovanje pukotine prema LEMF modelu je uvjetovano kritičnim intenzitetom naprezanja, koji je opet u funkciji efektivnog tlaka - tlaka na razini perforacija. Slika 20. prikazuje rezultirajući dijagram dubina frakture u krovinskom i podinskom dijelu tretirane formacije u zavisnosti o tlaku na razini perforacija. Odavde se ekstrapolacijom ostvarenih visina generira „krivulja ravnotežnih visina“, gdje se tlak na sredini perforacija preračunava u ekvivalentni efektivni tlak.



Slika 20. Dijagram visina frakture u zavisnosti o tlaku na razini perforacija, preuzeto iz Yang et al. (2012).

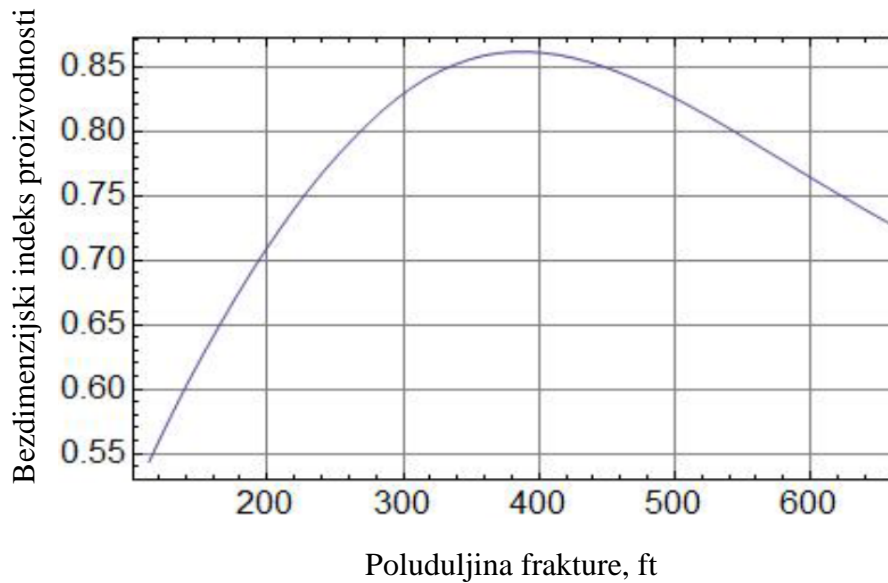
Formiranje druge krivulje zasniva se na principima iz UFD i 2D PKN (Perkins-Kern-Nordgen, 1961) modela hidrauličkog frakturiranja. Za generiranje ove krivulje prvo je potrebno pretpostaviti različite visine frakture, zatim se iz pretpostavljene mase podupirača odredi bezdimenzijski broj podupirača, i na kraju se izračuna optimalna poluduljina frakture. Za tu optimalnu poluduljinu, uz pomoć 2D PKN modela hidrauličkog frakturiranja računa se efektivni tlak i odgovarajuća širina. Presjecište ovih krivulja daje rješenje sustava, odnosno ravnotežnu visinu frakture i odgovarajući efektivni tlak, te za tu visinu, optimalnu poluduljinu i hidrauličku širinu frakture. Slika 21. prikazuje rezultirajući graf (Yang et al., 2012). Na ovaj način je funkcionalno povezana mehanika hidrauličkog frakturiranja i optimizacijski *UFD* postupak. Izračunata širina frakture prema ovom postupku najčešće ne odgovara optimalnoj.



Slika 21. Graf visina frakture u zavisnosti o efektivnom tlaku, preuzeto iz Yang et al. (2012).

Yang et al. (2012) proširili su ovaj postupak. Problem je postavljen na sljedeći način : za geometrijska svojstva višeslojnog ležišta, vrstu podupirača i pretpostavljenu masu, te svojstva radnog fluida kojim se izvodi hidrauličko frakturiranje potrebno je pronaći poluduljinu frakture koja će dati maksimalni bezdimenzijski indeks proizvodnosti. U prvi plan su stavili izračun optimalne poluduljine i odnosne širine frakture, pri različitim kombinacijama ravnotežnih odnosa visina pukotine i efektivnog tlaka. Varijacije efektivnog tlaka, a time i ravnotežnih visina frakture postižu se promjenama tlaka na razini perforacija. Tlak na razini perforacija funkcionalno je zavisao o veličini protoka fluida za frakturiranje i njegovim reološkim i filtracijskim svojstvima. Ovaj postupak uvažava i restrikcije vezane za maksimalnu visinu frakture, u podinskom i/ili krovinskom dijelu tretirane formacije. Temeljem izračunatih optimalnih poluduljina fraktura i ekvivalentnih širina, računa se bezdimenzijska provodljivost frakture iz koje se dobiva bezdimenzijski indeks proizvodnosti. Generiranjem grafa zavisnosti optimalnih poluduljina frakture i bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti, kako je prikazano na slici 22., može se razlučiti globalni maksimum. Time je određen maksimalno mogući indeks proizvodnosti. Idući korak kojeg su autori predložili je izrada programa hidrauličkog frakturiranja. Programa koji će za razmatranu masu podupirača, fluida za frakturiranje i efektivni tlak u konačnosti rezultirati geometrijom frakture i bezdimenzijskom provodljivošću frakture svojstvene za točku globalnog maksimuma.





Slika 22. Graf zavisnosti optimalnih poluduljina frakture i bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti, preuzeto iz Yang et al. (2012).

Ovaj postupak autori su okarakterizirali kao pseudo-3D model gdje se nezavisno određuju visina te maksimalna poluduljina i širina frakture. Treba naglasiti da u ovim istraživanjima nisu razmatrali utjecaj pješčanog zasipa na ukupni bezdimenzijski indeks proizvodnosti. U takvim okolnostima postavlja se pitanje je li moguće i pod kojim uvjetima, izraditi program hidrauličkog frakturiranja koji će uključivanjem treće dimenzije (visine) u konvencionalni UFD postupak rezultirati teoretski maksimalno mogućim indeksom proizvodnosti.

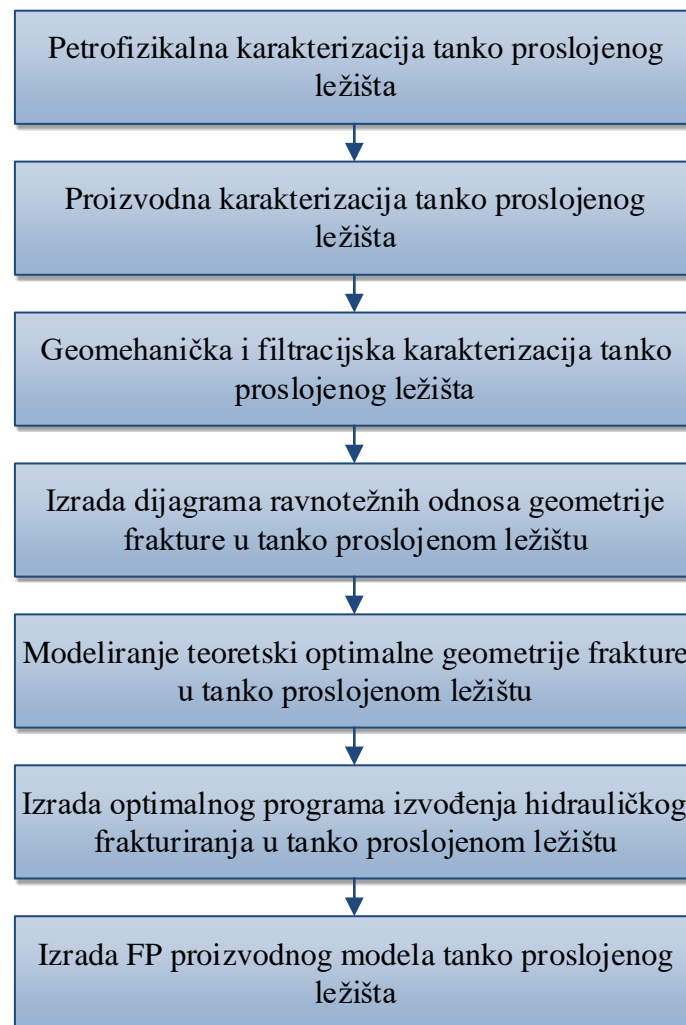
Zbog toga je problem kojeg su za višezonalna ležišta postavili Yang et al. (2012) redefiniran na sljedeći način: potrebno je pronaći optimalni program hidrauličkog frakturiranja koji će rezultirati optimalnom poluduljinom i optimalnom širinom u granicama dozvoljene visine frakture, dakle u trodimenzionalnom prostoru. Ostvarena optimalna bezdimenzijska provodljivost frakture i maksimalni bezdimenzijski indeks proizvodnosti treba pri tome biti jednak ili gotovo jednak, onom iz konvencionalnog *UFD* postupka. Rezultirajuća optimalna geometrija frakture mora kompenzirati i negativne efekte uzrokovane linearnim *skinom* i turbulencijom plina ako postoje.

Ovo je kompleksan problem i zahtjeva povezivanje teorije i prakse korištenjem najnovijih dostignuća u rezoluciji i interpretaciji karotažnih mjerenja i mogućnosti korištenih računalnih programa zadnje generacije. Problem postaje još kompleksniji kada su pitanju tanko proslojena ležišta zbog malih razlika u geomehaničkim, filtracijskim i proizvodnim svojstvima pojedinih

proslojaka. Za postizanje ovih ciljeva uvedena je nova metoda koja interaktivno povezuje 3D numeričku simulaciju formiranja geometrije frakture i određivanja optimalne geometrije frakture prema konvencionalnoj *UFD* proceduri.

Ova metoda primijenjena je tijekom istraživanja na tanko proslojenom ležištu PLQ-F u bušotinama SJ – 1 Dir i SJ – 2 Dir za koje je u konačnosti dan optimalni program hidrauličkog frakturiranja.

Dijagram toka na slici 23. zorno prikazuje metodologiju provedenog istraživanja.



Slika 23. Dijagram toka određivanja proizvodnog potencijala bušotina u hidraulički frakturiranim tanko proslojenim ležištima plina

Metodologija se očituje u provedbi sljedećih koraka:

1. Petrofizikalna karakterizacija tanko proslojenog ležišta

Korak u kojem se vrši zonacija tanko proslojenih ležišta na tri karakteristične litologije: šejl, silt i pijesak. Za svaku litologiju (zonu ili proslojak) određuje se porozitet, zasićenja (plin

ili slojna voda) i propusnost prema Timur – Coates jednadžbi. Pri tome je šejl karakteriziran kao nepropustan, silt slabo propustan, a pijesak s obzirom na veličinu propusnosti dodatno klasificiran na prljavi pijesak, pijesak i nekonsolidirani pijesak. Također se procjenjuju inicijalna geomehantička i filtracijska svojstva pojedinih zona, odnosno gradijenti minimalnih naprezanja, Youngovog modula elastičnosti, Poissonovog omjera, žilavosti i efektivnog koeficijenta filtracije radnog fluida. Geomehantička svojstva pojedinih zona apliciraju se na način da svaka litologija ima svoju jedinstvenu vrijednost. Vrijednosti efektivnog koeficijenta filtracije radnog fluida distribuiraju se linearno, gdje s porastom propusnosti pojedine zone raste i vrijednosti koeficijenta filtracije radnog fluida. Određivanje početnih veličina temelje se na povijesnim podacima sličnih ležišta (istih ili sličnih karotažnih odraza) ili karotažnih i laboratorijskih mjerenja jezgara (dinamička geomehantička svojstva) ako su raspoloživa. Izlazni podatak ovog koraka je i moćnost ležišta po Timur – Coatesu koja je uz moćnost ležišta dobivenu tijekom proizvodne karakterizacije ulazni parametar za izračun koeficijenta korekcije propusnosti  $\xi_{NMR}$ .

## 2. Proizvodna karakterizacija tanko proslojenog ležišta

Korak u kojem se vrši određivanje proizvodnih karakteristika ležišta temeljem provedenih proizvodnih testiranja i proizvodnog historijata na istom ili sličnim ležištima. Iz proizvodnih testiranja dobivaju se podaci nužni za izradu proizvodnog modela: uzorak plana za pVT analizu, ležišni tlak, moćnost ležišta, *skin* efekt i indeks proizvodnosti. Iz proizvodnog historijata dobivaju se podaci nužni za račun materijalnog uravnoteženja ležišta, odnosno ležišnu simulaciju ako se radi dinamički proizvodni model ležišta. Moćnost ležišta ulazni je parametar za izračun koeficijenta korekcije propusnosti  $\xi_{NMR}$ . Preko koeficijenta korekcije propusnosti  $\xi_{NMR}$ , određuje se efektivna propusnost za plin svakog proslojka. Pri tome je šejl karakteriziran kao nepropustan, silt veličine efektivne propusnosti za plin do 1 mD, a pijesak dodatno klasificiran na prljavi pijesak, pijesak i nekonsolidirani pijesak u ekvivalentnim rasponima propusnosti 1-5 mD, 5-50 mD i >50 mD.

## 3. Geomehantička i filtracijska karakterizacija tanko proslojenog ležišta

Korak u kojem se prvo u 3D simulatoru hidrauličkog frakturiranja formira model već izvedenog frakturiranja na istom ili ležištima sličnog karotažnog odraza. Ovdje se temeljem simultanih promjena geomehantičkih i filtracijskih parametara ležišta kod aktualnih protoka i koncentracija podupirača vrši usklađivanje efektivnog tlaka (engl. *Net Pressure Match*). Jednom usklađen, ovaj model može poslužiti kao analogni za dodatnu analizu proizvodnog

potencijala za isto ili slično ležište u drugoj bušotini ili za opis već izvedenog procesa frakturiranja. Na primjeru bušotine SJ – 2 Dir provedeno je istraživanje za originalni slučaj zonacije koji se temeljio na „brzoj petrofizikalnoj interpretaciji“ (engl. *Quick Look CPI Petrophysical Interpretation*) i paralelno na zonaciji kasnije provedene TLA analize. Usklađeni model bušotine SJ – 2 Dir kasnije je korišten za istraživanja u bušotini SJ – 1 Dir.

Usporedo s korekcijama geomehaničkih svojstava pojedinih zona koja se očituju u postotnom povećanju/smanjenju inicijalne vrijednosti provodi se i korekcija distribucije efektivnog koeficijenta filtracije radnog fluida. Ova korekcija temelji se na pretpostavci da je raspon koeficijenta filtracije pojedine litologije korelativan rasponu propusnosti iste litologije. Kao korelacijska u ovom je istraživanju korištena linearna funkcija:

$$C_i = a_c k_{g,i} + b_c, \quad (4.1)$$

gdje su:

$C_i$  - efektivni koeficijent filtracije i-tog proslojka,  $m \cdot \text{min}^{-1/2}$ ;

$a_c$  - koeficijent pravca linearne funkcije za određenu litologiju,  $\frac{m \cdot \text{min}^{-1/2}}{mD}$ ;

$k_{g,i}$  - efektivna propusnost i-tog proslojka za plin,  $mD$ ;

$b_c$  - odsječak na osi koeficijenta filtracije za određenu litologiju,  $m \cdot \text{min}^{-1/2}$ .

Temeljem iskustva na istom ili sličnim ležištima određuju se početne granice, odnosno raspon kretanja efektivnog koeficijenta filtracije koji je u korelativnom odnosu s propusnosti za plin za pojedine litologije. Raspon kretanja efektivnog koeficijenta filtracije može se definirati i u odnosu na Timur – Coatesovu propusnost. U konačnici rezultat distribucije efektivnog koeficijenta filtracije je isti. Izračun koeficijenta nagiba pravca dan je u slijedećem obrascu:

$$a_{C,lito.} = \frac{C_{Gornja\ granica,lito.} - C_{Donja\ granica,lito.}}{k_{g,Gornja\ granica,lito.} - k_{g,Donja\ granica,lito.}}. \quad (4.2)$$

Vrijednost odreska na osi y,  $b_{C,lito.}$ , jednaka je vrijednosti  $C_{lito.}$  kod, osim za šejl, virtualne vrijednosti propusnosti litologija od  $0,00mD$ . Pomoću dobivene jednadžbe određuje se

početna distribucija efektivnog koeficijenta filtracije, odnosno inicijalna vrijednost koeficijenta filtracije svakog pojedinog proslojka  $C_i$ .

Odavde se računa i tzv. inicijalna filtracijska moćnost ležišta  $\sum_{i=1}^n (C_i h_i)_{inic.}$ .

Budući da se kod tanko proslojenih ležišta radi o velikom broju proslojaka različitih vrijednosti koeficijenta filtracije (propusnosti) i ovdje je primijenjena tehnika uporabe tzv. koeficijenta korekcije filtracije  $\xi_C$ . Isti je određen izrazom:

$$\xi_C = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i h_i)_{korig.}}{\sum_{i=1}^n (C_i h_i)_{inic.}} = \frac{\bar{C}_{korig.}}{\bar{C}_{inic.}}, \quad (4.3)$$

gdje je srednja korigirana vrijednost efektivnog koeficijenta filtracije jednaka:

$$\bar{C}_{korig.} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i h_i)_{korig.}}{(h_i)}, \quad (4.4)$$

odnosno inicijalna srednja vrijednost efektivnog koeficijenta filtracije je:

$$\bar{C}_{inic.} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i h_i)_{inic.}}{(h_i)}. \quad (4.5)$$

Tehnika korekcije bazira se na promjenama srednje korigirane vrijednosti efektivnog koeficijenta filtracije ležišta  $\bar{C}_{korig.}$  i računanja odnosnog koeficijenta korekcije filtracije  $\xi_C$  prema obrascu (4.3).  $\bar{C}_{korig.}$  i  $\xi_C$  koji daju distribuciju efektivnog koeficijenta filtracije u kombinaciji s korigiranim vrijednostima geomehaničkih svojstava takvu da su odstupanja efektivnog tlaka u simulatoru zadovoljavajuća, uzimaju se kao aktualna. Korigirana distribucija efektivnog koeficijenta filtracije konačno se dobiva temeljem obrasca:

$$C_{i,korig.} = \xi_C C_{i,inic.} \quad (4.6)$$

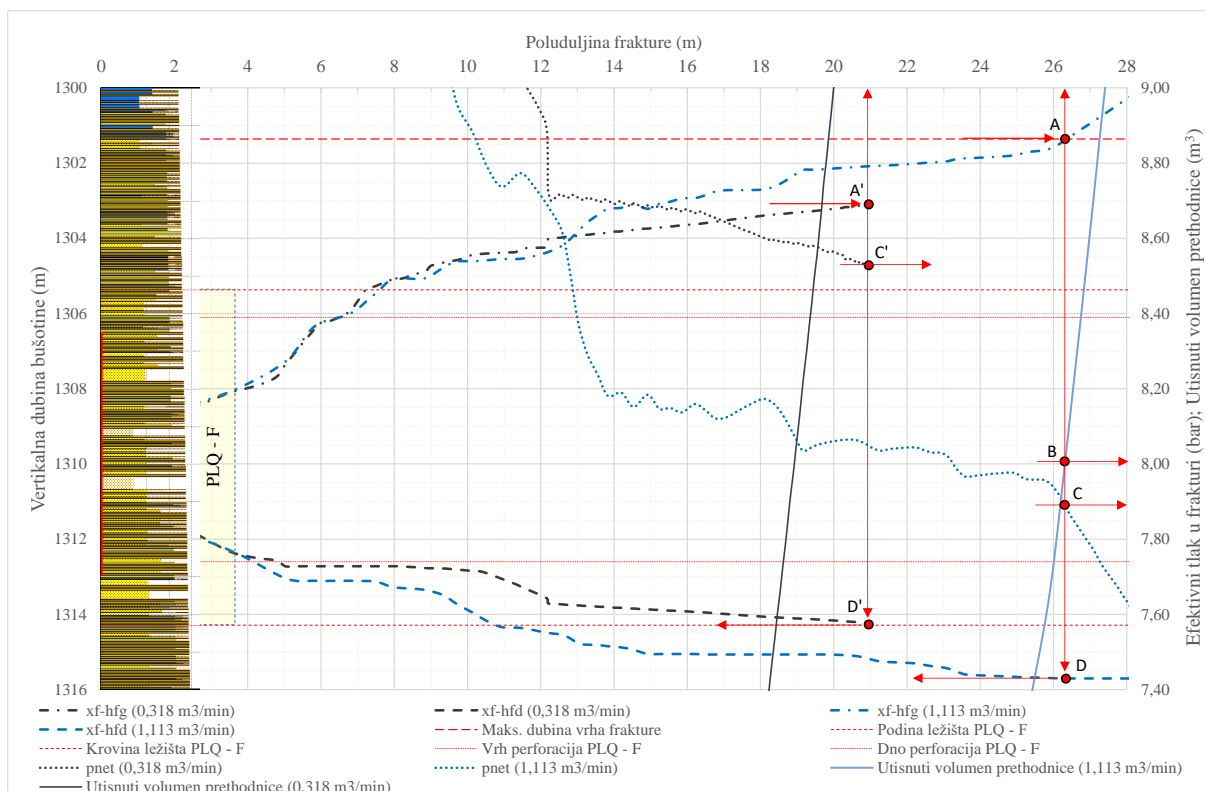
Valorizacija kvalitete postavljenog modela temelji se na veličini odstupanja efektivnog tlaka. Zbog kompleksnosti simulacije uvjetovane značajnim brojem varijabli koje utječu na rezultat, uzeto je pravilo da se modeli s odstupanjem manjim od  $\pm 5\%$  mogu smatrati vrlo dobrim, a odstupanjem do  $\pm 10\%$  zadovoljavajućim. U konačnici to znači da će greška simulacije biti to veća koliko je velika greška u procjeni geomehaničkih i filtracijskih svojstava

ležišta/proslojaka/zona. Upravo to je razlog zašto je *TLA* analiza uzeta kao temelj ovog istraživanja. Rezolucija ulaznih varijabli koja ona daje znatno je veća, odnosno „gušće“ su definirane pojedine zone/litologije, tako da *TLA* analiza sama po sebi treba voditi k rezultatu s većom preciznošću. Tijekom postupka usklađivanja tlaka kod ovog se istraživanja pokazalo da najveći utjecaj na rezultat imaju gradijent naprezanja i ukupni koeficijent filtracije pojedine zone. Žilavost proslojaka, Poissonov omjer i Youngov modul elastičnosti manje su magnitude utjecaja na konačni rezultat.

#### 4. Izrada dijagrama ravnotežnih odnosa geometrije frakture

Korak u kojem se za različite protoke i maksimalni mogući volumen prethodnice, u usklađenom 3D modelu hidrauličkog frakturiranja, temeljenom na *TLA* zonaciji, određuje međuzavisnost efektivnih tlakova u frakturi i formirane geometrije, njene poluduljine i dubine vrha i dna u bušotini.

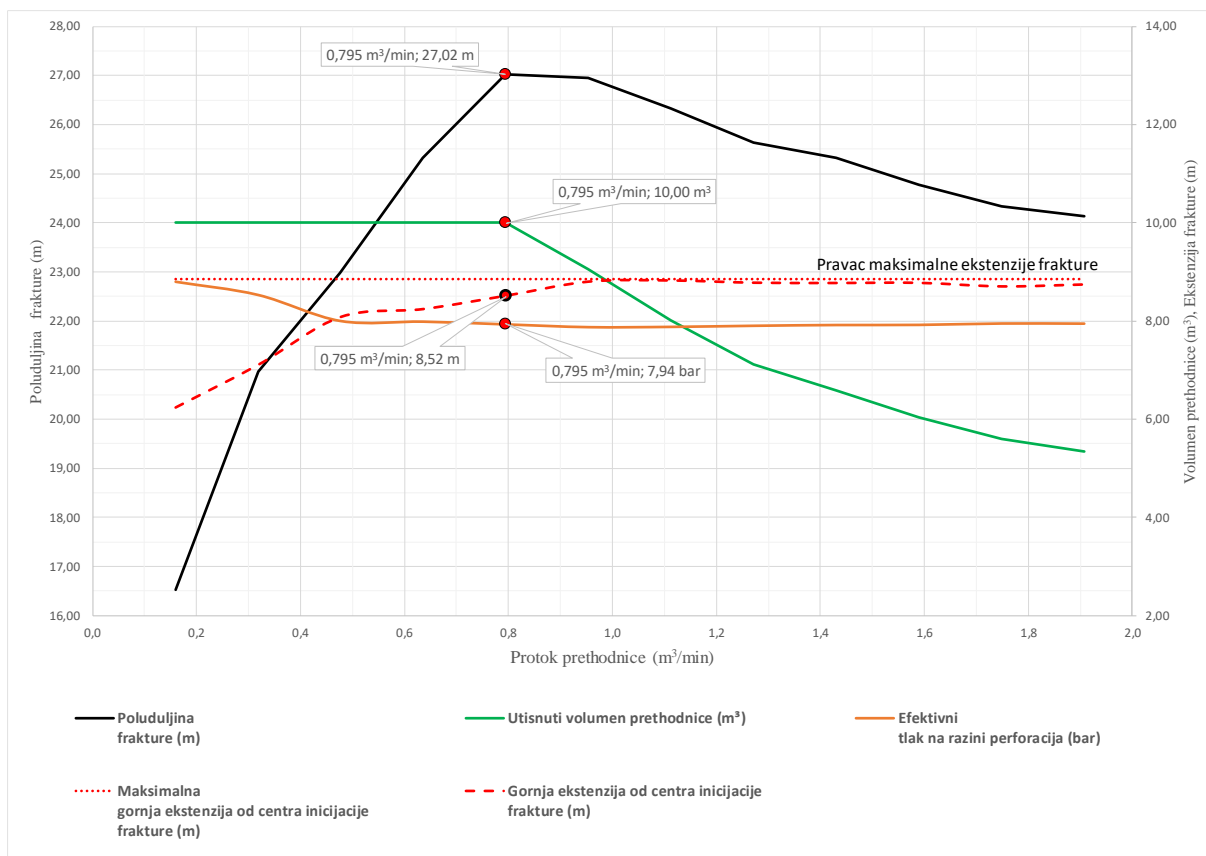
Primjer grafičkog prikaza rezultata provedene simulacije dan je na slici 24. Prikazani dijagram naziva se još i dijagram ravnotežnih odnosa geometrije frakture u funkciji veličine protoka prethodnice. Pravac „Maks. dubina vrha frakture“ predstavlja granični pravac koji označava maksimalnu visinu frakture prije prodora u zonu ležišta pretežno zasićenom slojnom vodom. Presjecište ravnotežne krivulje „*xf-hfg*“ s graničnim pravcem u točki A označava maksimalno moguću ostvarenu poluduljinu za razmatrani protok te volumen prethodnice prije prodora u neželjenu zonu. Krivulja označena kao „*pnet*“ predstavlja odnosni efektivni tlak u frakturi sveden na razinu perforacija u bušotini. Efektivni tlak u točki C korespondira s vrijednostima presjecišta točke A i predstavlja efektivni tlak kod kojeg dolazi do proboja frakture izvan granične visine. To je moguće tek kod utisnutog volumena prethodnice označenog u točki B. Točka D je ravnotežna točka dna frakture u bušotini. Isti proces se aplicira u koliko bi fraktura prvo dosegla granični pravac dna frakture. Spomenute točke/vrijednosti odnose se na određeni konstantni protok prethodnice, u ovom slučaju  $1,113 \text{ m}^3/\text{min}$ . Količina prethodnice je obično uvjetovana kapacitetom rezervoarskog prostora, tako da je moguće da kod nižih protoka cjelokupni raspoloživi volumen bude utisnut u ležište, a da pri tome ne dođe proboja frakture van graničnih pravaca. Takav slučaj je na slici 24. prikazan za veličinu protoka prethodnice od  $0,318 \text{ m}^3/\text{min}$  gdje točke A' i D' predstavljaju dubinu vrha odnosno dna frakture u bušotini. Raspoloživa količina prethodnice je u oba prikazana slučaja  $10 \text{ m}^3$ .



Slika 24. Dijagram ravnotežnih odnosa geometrije frakture u funkciji veličine protoka prethodnice.

Ukoliko se za različite protoke kod istog volumena prethodnice generira familija krivulja, tada se ekstrapolacijom pojedinačnih rješenja maksimalne poluduljine frakture dobiva dijagram ravnotežnih odnosa maksimalnih poluduljina frakture, efektivnog tlaka i volumena prethodnice u funkciji veličine protoka prethodnice. Slika 25. daje primjer generiranog dijagrama temeljem rješenja iz slike 66. priloga 6. Rezultati ekstrapolacije za tri odabrana protoke prethodnice prikazani su u tablici 2. Iz ovog se dijagrama može razlučiti globalno maksimalna poluduljina frakture. Iznosi 27,02 m i postiže se kod protoka prethodnice od 0,795 m<sup>3</sup>/min i utisnutog volumena 10 m<sup>3</sup>. Rezultirajući efektivni tlak na kraju utiskivanja je 7,94 bar-a.

Iz ovog koraka crpe se ulazni podaci za modeliranje teoretski optimalne geometrije frakture. Tablica 3. daje prikaz ulaznih podataka, i to u proširenom rasponu protoka prethodnice.



Slika 25. Dijagram ravnotežnih odnosa maksimalno ostvarenih poluduljina frakture, efektivnog tlaka i volumena prethodnice u funkciji veličine protoka prethodnice.

Tablica 2. Rezultati ekstrapolacije rješenja simulacije za maksimalne poluduljine frakture kod tri odabrana protoka prethodnice.

Protok	Vrijeme utiskivanja	Utisnuti volumen prethodnice	Efektivni tlak na razini perforacija	Tlak u bušotini	Poluduljina frakture	Srednja širina frakture	Gornja ekstenzija od centra inicijacije frakture	Dubina vrha frakture	Doljnja ekstenzija od centra inicijacije frakture	Dubina dna frakture
(m <sup>3</sup> /min)	(min)	(m <sup>3</sup> )	(bar)	(bar)	(m)	(mm)	(m)	(m)	(m)	(m)
0,318	31,45	10,00	8,53	211,98	20,97	3,4	7,11	1303,10	4,01	1314,23
0,795	12,58	10,00	7,94	211,45	27,02	3,7	8,52	1301,69	5,45	1315,67
1,113	7,20	8,01	7,89	211,41	26,32	3,7	8,83	1301,38	5,49	1315,70

Tablica 3. Ulazni podaci za modeliranje teoretski optimalne geometrije frakture u proširenom rasponu protoka prethodnice.

3D simulator	Q <sub>pret</sub>	(bbl/min)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Q <sub>pret</sub>	(m <sup>3</sup> /min)	0,159	0,318	0,477	0,636	0,795	0,954	1,113	1,272	1,431	1,590	1,749	1,908
	V <sub>pret</sub>	(m <sup>3</sup> )	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	9,06	8,01	7,12	6,58	6,04	5,60	5,34
	t <sub>pret</sub>	(min)	62,90	31,45	20,97	15,73	12,58	9,50	7,20	5,60	4,60	3,80	3,20	2,80
	x <sub>f</sub>	(m)	16,52	20,97	22,98	25,32	27,02	26,95	26,32	25,63	25,32	24,77	24,33	24,14
	w <sub>f,cr</sub>	(mm)	3,16	3,40	3,50	3,61	3,70	3,73	3,74	3,74	3,74	3,74	3,73	3,74
	V <sub>f</sub>	(m <sup>3</sup> )	0,837	1,296	1,697	2,008	2,287	2,350	2,304	2,232	2,209	2,158	2,103	2,098



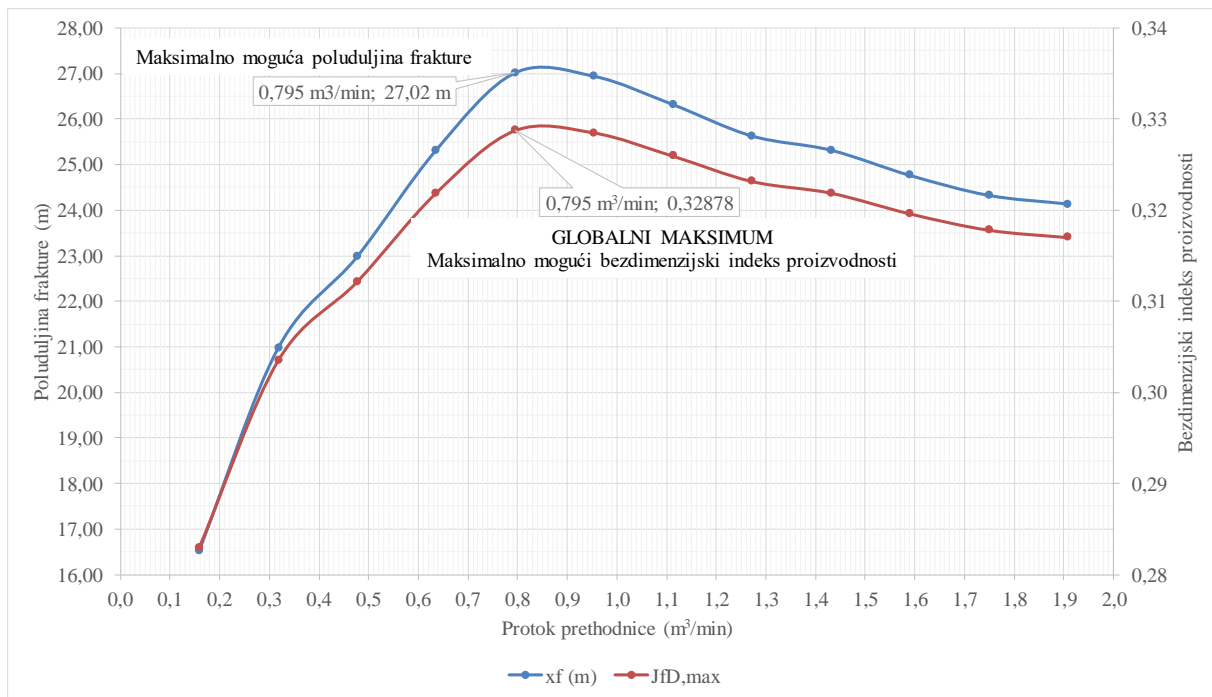
## 5. Modeliranje teoretski optimalne geometrije frakture

Jednom kada su poznate maksimalne poluduljine frakture pristupa se modeliranju teoretski optimalne geometrije frakture prema postupku prikazanom u poglavlju 3.1.10. Proračun se provodi iterativno mijenjajući masu utisnutog podupirača (broja podupirača) u propusni dio frakture do zadovoljenja uvjeta da je poluduljina frakture iz prethodnog koraka jednaka izračunatoj po proceduri UFD. Postupak se provodi za puni raspon protoka prethodnice određenih u prethodnom koraku. Primjer rezultata proračuna za tri odabrana protoka prethodnice dan je u tablici 4.

Tablica 4. Rezultati proračuna teoretski optimalne geometrije frakture za tri odabrana protoka prethodnice.

<b>3D simulator</b>	<b>Q<sub>pret</sub></b>	(bbl/min)	2	5	7
	<b>Q<sub>pret</sub></b>	(m <sup>3</sup> /min)	0,318	0,795	1,113
	<b>V<sub>pret</sub></b>	(m <sup>3</sup> )	10,00	10,00	8,01
	<b>t<sub>pret</sub></b>	(min)	31,45	12,58	7,20
	<b>x<sub>f</sub></b>	(m)	20,97	27,02	26,32
	<b>w<sub>f,sr</sub></b>	(mm)	3,40	3,70	3,74
	<b>V<sub>f</sub></b>	(m <sup>3</sup> )	1,296	2,287	2,304
	<b>UFD model</b>	<b>m<sub>prop,ef</sub></b>	(kg)	3 546	5 588
<b>V<sub>f,ef</sub></b>		(m <sup>3</sup> )	1,876	2,957	2,821
<b>k<sub>f,ef</sub></b>		(mD)	47 615	50 125	49 866
<b>N<sub>prop</sub></b>			0,00996	0,01652	0,01568
<b>C<sub>FD,opt</sub></b>			1,60	1,60	1,60
<b>J<sub>FD,max</sub></b>			0,30351	0,32878	0,32598
<b>FOI<sub>max</sub></b>			1,55	1,68	1,66
<b>x<sub>f,opt</sub></b>		(m)	20,97	27,02	26,32
<b>w<sub>f,opt</sub></b>		(mm)	5,01	6,14	6,01
<b>S<sub>ff</sub></b>			0,0000	0,0000	0,0000
<b>S<sub>ck,w</sub></b>			0,0000	0,0000	0,0000
<b>S<sub>ck,k</sub></b>			0,0000	0,0000	0,0000
<b>J<sub>FD</sub></b>			0,30351	0,32878	0,32598
<b>S<sub>f</sub></b>			-3,89	-4,14	-4,11
<b>FOI</b>			1,55	1,68	1,66
<b>q<sub>gSC,f</sub></b>		(m <sup>3</sup> /dan)	95 247	103 175	102 296
<b>q<sub>gSC,HDM</sub></b>		(m <sup>3</sup> /dan)	60 670	60 670	60 670
<b>Pogr.</b>	(%)	0,00002	0,00100	0,00520	

Zavisnost kretanja izračunatih vrijednosti poluduljina frakture (jednakih maksimalnima iz simulacije) i odnosnih teoretski bezdimenzijskih indeksa proizvodnosti, može se vidjeti na slici 26.



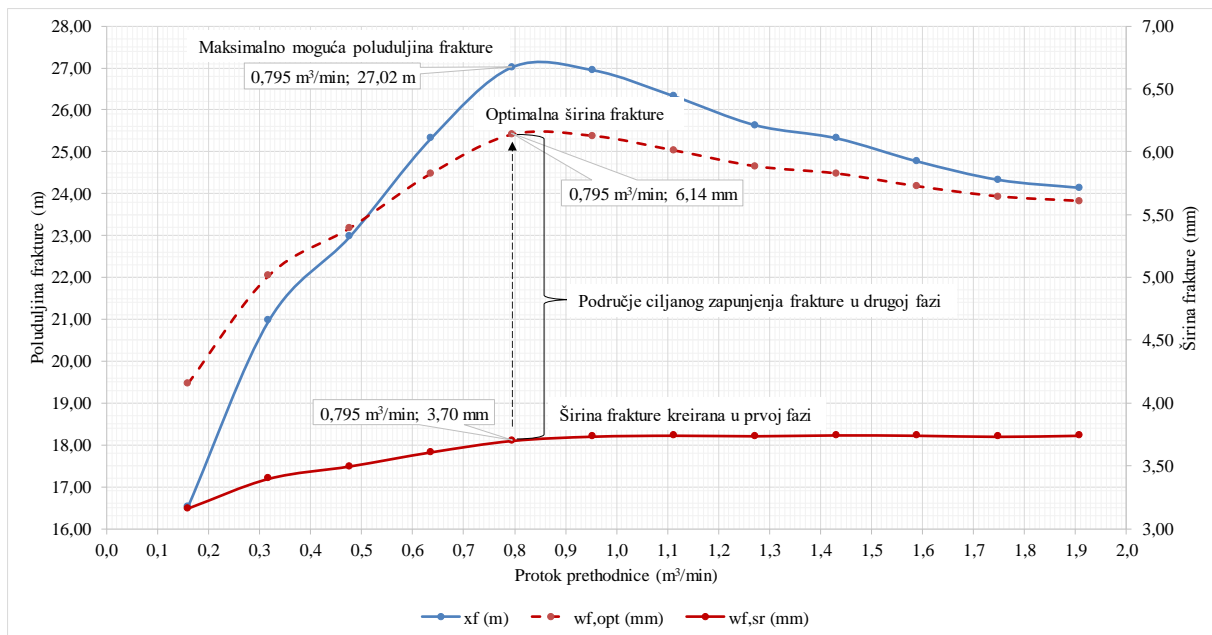
Slika 26. Zavisnost kretanja vrijednosti maksimalnih poluduljina frakture i odnosnih teoretski maksimalnih bezdimenzijskih indeksa proizvodnosti u funkciji protoka prethodnice.

Globalni maksimum izračunatog bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti poklapa se s maksimalno mogućom poluduljinom frakture koja se događa kod protoka prethodnice 0,795 m<sup>3</sup>/min. Globalni maksimum je ishodišna točka za idući korak, a to je izrada optimalnog programa izvođenja hidrauličkog frakturiranja. Osim vrijednosti poluduljine frakture, izračunate vrijednosti širine i bezdimenzijske provodljivosti frakture svojstvene ovoj točki predstavljaju cilj kojem optimalni program hidrauličkog frakturiranja treba težiti.

## 6. Izrada optimalnog programa izvođenja hidrauličkog frakturiranja

Prikazanim globalnim maksimumom određena je vrijednost protoka i količina radnog fluida (prethodnice) te vrijednost efektivnog tlaka pri kojem treba izvršiti prvu fazu hidrauličkog frakturiranja. U ovoj fazi dolazi do formiranja željene geometrije frakture, na način da dolazi do zapunjenja podupiračem njenog vrha i sprečavanja daljnjeg rasta u trenutku postizanja ciljne poluduljine i visine.

Potom se, u drugoj fazi, uz pomoć TSO tehnike frakturiranja, veličina efektivnog tlaka programira manipulacijom protoka i koncentracije podupirača u kaši na način da omogućava zapunjenje frakture od vrha prema bušotini. Rezultirajuća širina frakture treba odgovarati optimalnoj, određenom globalnim maksimumom. Slika 27. zorno prikazuje taj proces.



Slika 27. Grafički prikaz faznog procesa kreiranja optimalne širine frakture.

Program hidrauličkog frakturiranja koji će rezultirati geometrijom i bezdimenzijskom provodljivošću frakture u rasponu pogreške  $\pm 1\%$  u odnosu na vrijednosti određenim globalnim maksimumom smatra se optimalnim.

## 7. Izrada FP proizvodnog modela

Završni korak je izrada proizvodnog modela ležišta opremljenog tehnikom FP. Određivanje proizvodnog potencijala zasniva se na principima prikazanim u poglavlju 3.1.9. i sukladno proceduri i obrascima detaljno opisanima u poglavlju 3.1.11. Konačni rezultat je indikatorska krivulja koja opisuje područje protjecanja plina iz ležišta u bušotinu uvažavajući sve restrikcije koje se javljaju od drenažnog radijusa, kroz ležište i frakturu te sustav pješčanog zasipa. Glavni pokazatelj kojim se mjeri uspješnost hidrauličkog frakturiranja je stimulacijski efekt (engl. *Folds of Increase – FOI*) kao mjera relativnog povećanja indeksa proizvodnosti u odnosu na neko referentno stanje. Istraživanje na ležištu PLQ-F u istražnoj bušotini SJ – 1 Dir provedeno je sa svrhom utvrđivanja mogućnosti relativnog povećanja indeksa proizvodnosti (proizvodnog potencijala) u odnosu na završno stanje nakon provedenih hidrodinamskih mjerenja. Znači, konvencionalno zacijevljene bušotine s perforacijama u ograničenom intervalu ležišta. Istraživanje je na tom ležištu provedeno i u proizvodnoj bušotini SJ – 2 Dir. Ležište je ovdje u višegodišnjoj proizvodnji, hidraulički frakturirano tehnikom FP. Cilj ovog istraživanja bio je procijeniti relativno povećanja indeksa proizvodnosti za slučaj da se prilikom projektiranja hidrauličkog frakturiranja primijenila nova metodologija.

### **4.3. Određivanje proizvodnog potencijala tanko proslojenog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir – konvencionalni UFD pristup**

U ovom poglavlju prikazan je primjer određivanja proizvodnog potencijala ležišta PLQ-F konvencionalnim UFD pristupom. Cilj provedenog istraživanja je odrediti optimalnu geometriju koja će za pretpostavljenu masu podupirača i visinu frakture rezultirati maksimalnim bezdimenzijskim indeksom proizvodnosti. Pri tome je potrebno utvrditi magnitudu utjecaja efekta turbulencije plina i pješčanog zasipa na veličinu bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti. Budući da se optimalna geometrija frakture (njena duljina i širina) određuje za unaprijed određeni dinamički tlak u bušotini, dodatno je istražena veličina utjecaja „nesavršenosti“ odabrane geometrije u odnosu na druge proizvodne uvjete u bušotini. Svrha provedenog istraživanja je konvencionalnim *UFD* pristupom odrediti maksimalno mogući dobitak u proizvodnosti za slučaj buduće razrade ležišta u ovoj bušotini.

Ovim istraživanjem omogućena je komparativna analiza proizvodnog potencijala ležišta određenog konvencionalnim *UFD* pristupom i proizvodnog potencijala proizašlog iz primjene nove metode.

Problem je postavljen na sljedeći način: u ležište će biti utisnuta masa podupirača u vrijednosti 1000 kg/m vertikalne visine ležišta. Za očekivati je da će zbog migracije i akumulacije nevezanog ležišnog materijala, po površini lica frakture, doći do smanjenja efektivne propusnosti za plin za 50% u dubini ležišta od 0,3 m. Smanjenje propusnosti frakture zbog preostalog oštećenja radnim fluidom iznosi 10%. Pretpostavlja se srednje permanentno smanjenje propusnosti frakture u pribušotinskoj zoni od 50% u dubini 0,3 m. Ovo „prigušenje“ mjereno je od lica formacije po punoj visini frakture, a posljedica je izglednog odlaganja kamenca u pribušotinskoj zoni pri pojavi slojne vode u proizvodnji. Interpretacijom „testa porasta tlaka“ utvrđen je negativan *skin* efekt što upućuje na zaključak da ne postoji doprinos radijalnog oštećenja pribušotinske zone.

#### **4.3.1. Povijest radova i ulazni parametri konvencionalne *UFD* analize**

Izgradnja, testiranje i privremeno napuštanje istražne bušotine SJ – 1 Dir izvršeno je u ljeto 2013. Bušotina je izbušena sa zadatkom potvrde plinskih zasićenja tanko proslojenih ležišta PLQ-E, F i G serije i procjene njihova proizvodnog potencijala. Koso je usmjerena s maksimalnim nagibom 40° u području ciljanih ležišta. Osnovom detekcije pojava plina tijekom

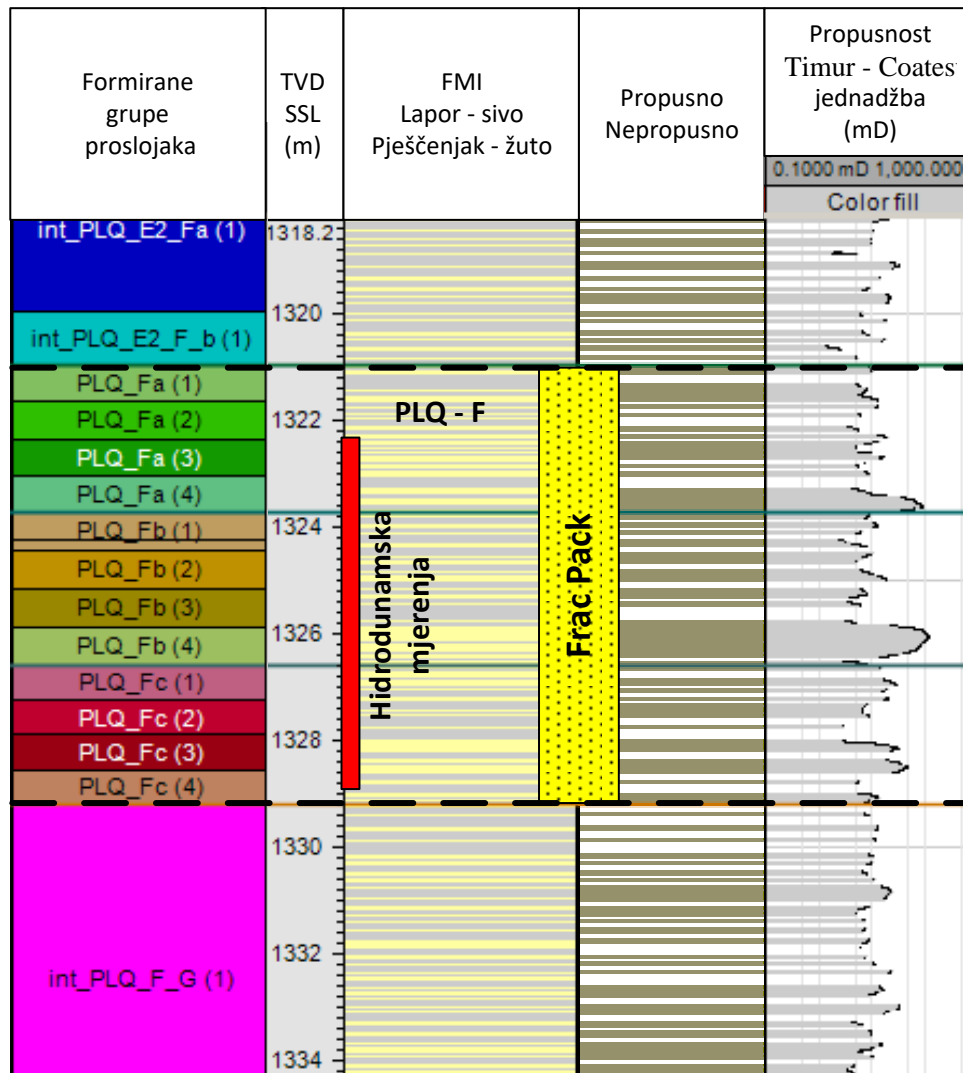
bušenja, WFT mjerenja i ekstenzivno provedenih karotažnih mjerenja, plinsko zasićenje potvrđeno je na ležištima PLQ-F i PLQ-G dok je samo djelomično zasićenje plinom potvrđeno na ležištu PLQ-E. U svrhu procjene proizvodnog potencijala provedena su konvencionalna hidrodinamska mjerenja na ležištu PLQ-F. Mjerenja su uključivala test uz više uvjeta protoka i test porasta tlaka. Po završetku mjerenja bušotina je privremeno napuštena ugradnjom cementnih mostova u proizvodnoj koloni zaštitnih cijevi i uporabom tzv. MLS (engl. *Mud Line Suspension*) sustava bušotinske glave na dnu mora.

#### 4.3.2. Petrofizikalna karakterizacija ležišta

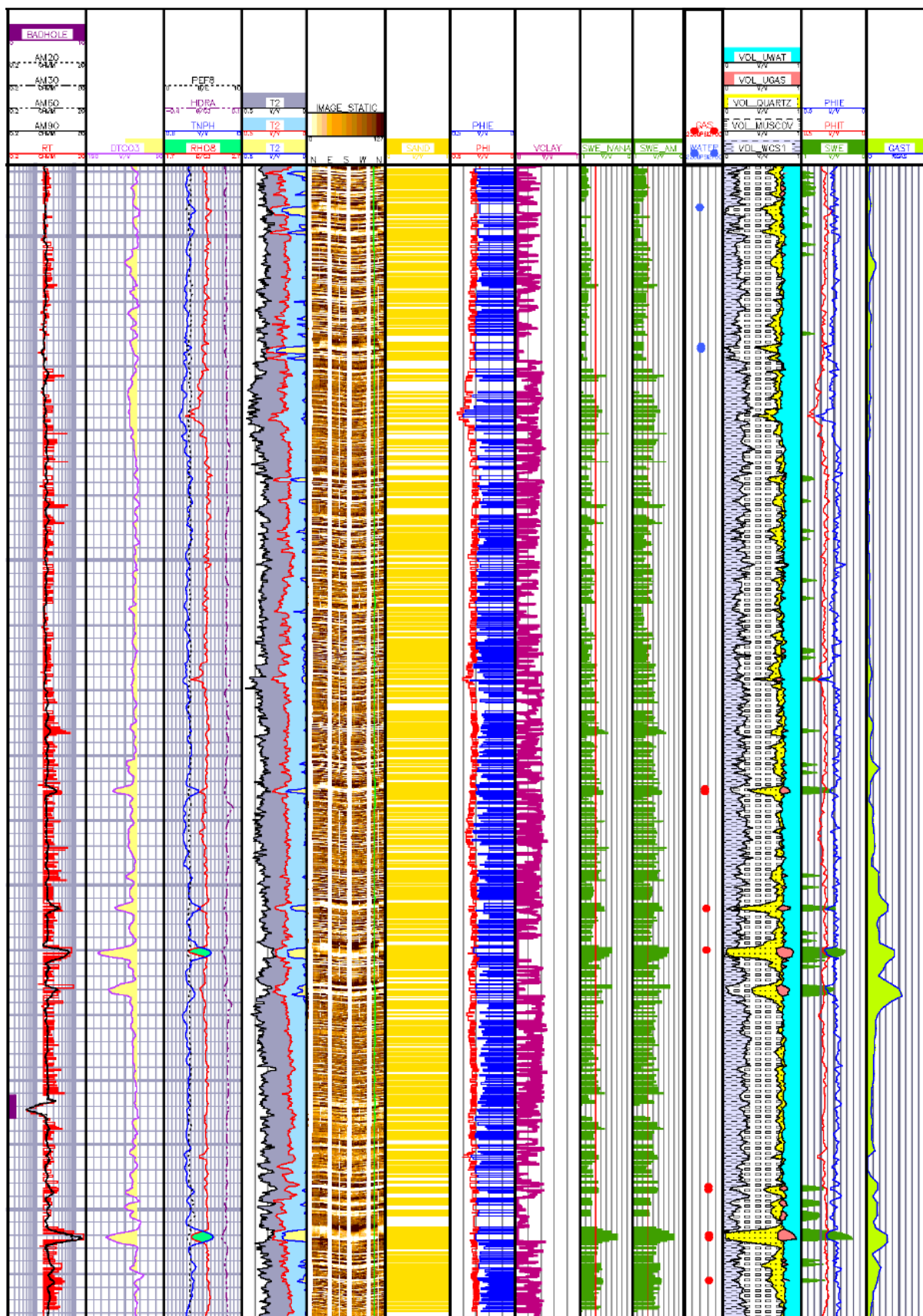
Petrofizikalna analiza na bušotini SJ – 1 Dir provedena je konvencionalnom *CPI* (engl. *Computer Processing Interpretation*) metodologijom i paralelno e-tlac® karakterizacijom tanko proslojenih ležišta (INA-ENI, 2013). Slika 29. prikazuje kompozitni dijagram rezultata petrofizikalne analize. Rezultati konvencionalne i e-tlac® interpretacije u suglasju su s detektiranim pojavama plina tijekom bušenja, karotažnim i WFT mjerenjima (INA-ENI, 2013). Tanko proslojeno ležište PLQ-F može se okarakterizirati kao izmjena nepropusnog siltoznog lapora i propusnih pješćanih proslojaka srednje debljine manje od 10 cm, vrlo rijetko do maksimalno 70 cm. Mjerenja dielektričnim sondama (ADT) pokazala su da su ta pješćana tijela općenito čista s visokom vrijednošću efektivnog poroziteta (INA-ENI, 2013). Kod ležišta PLQ-F detektirano je relativno nisko zasićenje vodom, posebice kod relativno debljih pješćanih tijela gdje se procjenjuje da je to zasićenje manje od 30% (INA-ENI, 2013). Izračun distribucije propusnosti temeljen je na provedenim NMR mjerenjima sukladno obrascu (2.1). Slika 28. prikazuje provedenu zonaciju okoline ležišta PLQ-F, odnosnu distribuciju efektivnog poroziteta, zasićenja vodom i propusnosti po Timur-Coates obrascu. Tablica 5. prikazuje srednje vrijednosti tih parametara.

Tablica 5. Srednje vrijednosti petrofizikalnih parametara ležišta PLQ-F u bušotini SJ – 1 Dir, preuzeto iz INA (2014).

Ležište	Zona ležišta	Mjerena dubina od vrtaćeg stola ( m )	Vertikalna dubina od vrtaćeg stola ( m )	Vertikalna dubina od razine mora ( m )	Udio pješćenjaka u ukupnoj debljini ležišta ( % )	Efektivna vertikalna debljina pješćenjaka ( m )	Aritmetička sredina efektivnog poroziteta pješćenjaka ( dio jedinice )	Aritmetička sredina zasićenja vodom pješćenjaka ( dio jedinice )	Aritmetička sredina distribucije propusnosti pješćenjaka po Timur - Coatesu ( mD )
PLQ-F	PLQ-Fa	1623,38	1352,30	-1321,00	49,86%	1,35	0,26	0,54671	19,4492
	PLQ-Fb	1627,00	1355,00	-1323,70	55,51%	1,61	0,28	0,50448	33,0981
	PLQ-Fc	1630,78	1357,90	-1326,60	41,25%	1,07	0,27	0,48364	18,9027



Slika 28. Zonacija ležišta PLQ-F i PLQ-G i odnosni profil distribucija efektivnog poroziteta, zasićenja vodom i propusnosti u bušotini SJ – 1 Dir, preuzeto iz INA-e (2014).



Slika 29. Kompozitni dijagram rezultata petrofizikalne analize na bušotini SJ – 1 Dir, preuzeto iz INA-ENI (2013).

#### 4.3.3. Proizvodna karakterizacija ležišta

Za potrebe određivanja proizvodnog potencijala tanko proslojenih ležišta provedena su hidrodinamska mjerenja na ležištu PLQ-F u intervalu 1626,0 m - 1634,0 m mjerene dubine. Raskrivanje ležišta izvršeno je TCP (engl. *Tubing Conveyed Perforating*) metodom u uvjetima podtlaka radnog fluida pomoću perforatora spiralne orijentacije, srednje gustoće punjenja i duboke penetracije. Kroz isti niz provedena su hidrodinamska mjerenja pomoću pokretnog mjernog separatora uz mjerenja tlaka i temperature na ušću i dnu bušotine. Mjerenja su uključivala sljedeće korake: čišćenje pribušotinske zone uz regulaciju tlaka i količine fluida preko dva konstantna otvora sapnice, inicijalni test porasta tlaka, test „protok za protokom“ preko tri otvora sapnice, test porasta tlaka i na kraju mjerenje statičkog gradijenta tlaka.

Proizvodne karakteristike raskrivenog dijela ležišta određene su interpretacijom testa porasta tlaka koji je trajao 24 sata s instrumentima za mjerenja tlaka i temperature smještenima na 1597,0 m mjerene dubine. Tablica 6. prikazuje rezultate interpretacije testa porasta tlaka.

Tablica 6. Rezultati interpretacije testa porasta tlaka na ležištu PLQ-F u bušotini SJ – 1 Dir, preuzeto iz INA-e (2013).

Proizvodnja m <sup>3</sup> /d	P <sub>wf</sub> bar	P <sub>R</sub> bar	kh mDm	k mD	r <sub>i</sub> m	S -	ΔP(S) bar
87 671	99.7	143.2	22.1	5.3	98.0	-0.9	-8.9

Tablica 71. (prilog 8.) daje detaljan tablični prikaz zonacije ležišta i distribucije propusnosti u bušotini SJ – 1 Dir kao rezultat TLA analize i provedene korekcije distribucije efektivnih propusnosti za plin. Vrijednosti ulaznih parametara kao što su moćnost ležišta i srednja propusnost pojedinih zona ili cjelokupnih ležišta izračunate su uz pomoć tabličnog kalkulatora u kojem su obrađivani podaci TLA analize.

Koeficijent korekcije propusnosti  $\xi_{NMR}$  za ležište PLQ-F izračunat je po metodologiji prezentiranoj u poglavlju 2.2.

Hidrodinamskim mjerenjima utvrđena moćnost ležišta PLQ-F u intervalu 1626,0 m - 1634,0 m mjerene dubine iznosi  $(k_g h_{ef})_{WT} = 22,06 mD$ . Moćnost ležišta procijenjena iz NMR

karotažnih mjerenja i TLA analize na istom intervalu jednaka je  $\sum_{i=1}^n (k_{NMR,i} h_i)_{WT} = 91,54 mD m$



za efektivnu debljinu ležišta  $(h_{ef})_{WT} = 3,05 \text{ m}$  (INA 2013). Sukladno obrascu (2.2) koeficijent korekcije propusnosti  $\xi_{NMR}$  za cjelokupno ležište PLQ-F tada je jednak:

$$\xi_{NMR} = \frac{(k_g h_{ef})_{WT}}{\sum_{i=1}^n (k_{NMR,i} h_i)_{WT}} = \frac{22,06 \text{ mD m}}{91,54 \text{ mD m}} = 0,24099.$$

Budući da efektivna debljina ležišta iz *TLA* analize u njegovom raskrivenom dijelu iznosi  $h_{ef,WT} = \sum_{i=1}^n (h_i)_{WT} = 3,05 \text{ m}$ , proizlazi da je srednja efektivna propusnost za plin testiranog dijela ležišta jednaka:

$$k_{g,WT} = \frac{\xi_{NMR} \sum_{i=1}^n (k_{NMR,i} h_i)_{WT}}{\sum_{i=1}^n (h_i)_{WT}} = 0,24099 \frac{91,54 \text{ mD m}}{3,05 \text{ m}} = 7,23 \text{ mD}.$$

Razlika procijenjenih vrijednosti efektivne propusnosti za plin dobivene iz interpretacije hidrodinamskih mjerenja i ovdje izračunate propusnosti temelji se na razlici u procjeni efektivnih debljina primijenjenih metoda. Procjene dobivene *TLA* analizom uzimaju se kao preciznije i treba ih kao takve koristiti ako su raspoložive. U svakom slučaju moćnost ležišta je, bilo da se efektivna debljina uzima iz konvencionalne procjene korištene tijekom analize testa porasta tlaka ili iz *TLA* analize, konstantna i nema utjecaj na konačnu procjenu proizvodnosti testiranog dijela ležišta.

Ležište PLQ-F u svojoj punoj debljini proteže se u intervalu 1623,40 m - 1634,13 m mjerene od razine vrtaćeg stola. Svedeno na vertikalnu dubinu ležište se proteže u intervalu 1352,30 m – 1360,47 m. Efektivna debljina cjelokupnog ležišta procijenjena *TLA* analizom iznosi  $(h_{ef})_{NMR} = \sum_{i=1}^n (h_i) = 4,03 \text{ m}$  a moćnost ležišta procijenjena iz *NMR* karotažnih mjerenja jednaka je  $\sum_{i=1}^n (k_{NMR,i} h_i) = 101,02 \text{ mD m}$ . Iz toga proizlazi da će srednja efektivna propusnost za plin cjelokupnog ležišta PLQ-F biti:

$$k_g = \frac{\xi_{NMR} \sum_{i=1}^n (k_{NMR,i} h_i)}{\sum_{i=1}^n (h_i)} = 0,24099 \frac{101,02 \text{ mD m}}{4,03 \text{ m}} = 6,04 \text{ mD},$$

a korigirana moćnost za plin cjelokupnog ležišta PLQ-F:

$$k_g h_{ef} = \xi_{NMR} \sum_{i=1}^n (k_{NMR,i} h_i) = 0,24099 \cdot 101,02 mD m = 24,34 mD m .$$

Srednja efektivna propusnost za plin ležišta PLQ-F ako se u proračun uzme puna debljina ležišta 8,17 m u tom slučaju iznosi:

$$k_g = \frac{\xi_{NMR} \sum_{i=1}^n (k_{NMR,i} h_i)}{\sum_{i=1}^n (h_i)} = 0,24099 \frac{101,02 mD m}{8,17 m} = 2,98 mD .$$

#### 4.3.4. Proizvodni model – konvencionalni *UFD* pristup

Tablica 7. prikazuje ulazne podatke proračuna.

Tablica 7. Ulazni podaci za proračun optimalnog indeksa proizvodnosti i geometrije frakture na ležištu PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

<b>pVT</b>			
Srednji ležišni tlak	$p_R$	bar	145,87
Ležišna temperatura	$t_R$	°C	30,00
Relativna gustoća plina	$g_g$		0,5571
Odnos kondenzata i plina	CGR	$m^3/m^3$	0,00
Gustoća kondenzata	$r_c$	$kg/m^3$	750,00
Odnos vode i plina	WGR	$m^3/m^3$	0,00
Relativna gustoća vode	$\gamma_w$		1,03
Molni udio H <sub>2</sub> S		%	0,00
Molni udio CO <sub>2</sub>		%	0,07
Molni udio N <sub>2</sub>		%	0,43
Korelacija za viskozitet (0 - Lee at al.; 1 - Carr at al.)		Carr at al.	1
<b>Ležište X (iz HDM - odnosi se samo na perforirani interval)</b>			
Moćnost ležišta u području perforiranog intervala	$(k_g h_{ef})_{WT}$	mD m	22,06
Efektivna propusnost za plin perforiranog intervala	$k_{g,WT}$	mD	7,23
Efektivna debljina ležišta perforiranog intervala iz TLA analize	$(h_{ef})_{WT}$	m	3,05
Drenažni radius bušotine	$r_e$	m	300
Polumjer bušotine	$r_w$	m	0,10795
Visina perforacija (mjerene duljine)	$h_p$	m	8,00
Perforirani interval		m	1626 - 1634
Ukupni skin efekt	$s_t$		-0,92
<b>Fraktura</b>			
Interval frakture (vertikalne duljine)		m	1352,3 -1360,47
Procijenjena visina frakture (vertikalna debljina ležišta)	$h_f$	m	8,17
Vertikalna dubina sredine perforacija	TVD	m	1357,32
Frakturni gradijent ležišta	$G_f$	bar/10 m	1,61
Moćnost ležišta za plin po visini frakture	$k_g h_{ef}$	mD m	24,34
Efektivna (propusna) debljina ležišta po visini frakture	$h_{ef}$	m	4,03
Efektivna propusnost samo propusnog dijela ležišta po visini frakture	$k_g$	mD	6,04
Porozitet podupirača	$\Phi_{prop}$	%	30%
Gustoća podupirača	$\rho_{prop}$	$kg/m^3$	2700
Procijenjeni gubitak permeabiliteta radi oštećenje rad. fluidom		%	10
Pretpostavljeni dinamički tlak tijekom proizvodnje,	$p_{wf}$	bar	99,70
<b>Skin uslijed oštećenja lica frakture, <math>S_{ff}</math></b>			
Širina oštećenja	$w_s$	m	0,30
Efektivna propusnost oštećene zone frakture (za efektivnu debljinu)	$k_{s,f}$	mD	3,02
<b>Skin uslijed prigušenja frakture, <math>S_{ck}</math></b>			
Širina suženja frakture	$w_{ck}$	m	0,00797
Duljina oštećenja frakture	$x_{f,ck}$	m	0,30
Efektivna propusnost oštećenja frakture - pribušotinska zona	$k_{f,ck}$	mD	20115

Sukladno prikazanom u poglavljima 3.1.10 i 3.1.11., u nastavku je primjer proračuna teoretski maksimalnog indeksa proizvodnosti i teoretski optimalne geometrije frakture konvencionalnim *UFD* pristupom. Proračun se za dinamički tlak na dnu bušotine  $p_{wf} = 99,70 \text{ bar}$  provodi na sljedeći način:

- 1) Pretpostavljena je masa podupirača koja će se utisnuti u ležište u iznosu

$$m_{prop} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \text{ vertikalne visine ležišta;}$$

- 2) Izračunati drenažni volumen ležišta  $V_R$  prema obrascu (3.58), odnosno volumen frakture  $V_{prop-2krila}$  prema obrascu (3.64);

- a. drenažni volumen ležišta PLQ-F,  $V_R$ ; uz pretpostavku da drenažni radijus iznosi  $r_e = 300 \text{ m}$  i da fraktura prekriva punu debljinu ležišta,  $h_f = 8,17 \text{ m}$

gdje je efektivna debljina ležišta jednaka  $h_{ef} = \sum_{i=1}^n (h_i) = 4,03 \text{ m}$ , drenažni

volumen ležišta iznosi:  $V_R = r_e^2 \pi h_{ef} = 300^2 \text{ m}^2 \times \pi \times 4,03 \text{ m} = 1\,139\,020 \text{ m}^3$ ;

- b. volumen podupirača u frakturi koji prekriva efektivno propusni dio ležišta

$V_{prop-2krila}$  biti će:

$$V_{prop-2krila} = \frac{m_{prop} \left( \frac{h_{ef}}{h_f} \right)}{(1 - \Phi_{prop}) \rho_{prop}} = \frac{(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \times 8,17 \text{ m}) \times \left( \frac{4,03 \text{ m}}{8,17 \text{ m}} \right)}{(1 - 0,30) \times 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 2,131 \text{ m}^3$$

- 3) Pretpostaviti Reynoldsov broj  $N_{Re}$ . Za početni uvjet  $N_{Re} = 0$ ; iteracija 1.

- 4) Pomoću obrasca (3.83) izračunati efektivnu propusnost frakture,  $k_{f,ef}$ , za početni

uvjet  $N_{Re} = 0 \Rightarrow k_{f,ef} = k_f$  a za svaki idući:

$$N_{Re} = N_{Re,pretpostavljeni} \Rightarrow k_{f,ef} = \frac{k_f}{1 + N_{Re,pretpostavljeni}}.$$

Ovdje je potrebno izvršiti korekciju propusnosti frakture na uvjete naprezanja koji vladaju u ležištu kroz sljedeće korake:

- a. efektivno naprezanje na podupirač frakture pri uvjetima zadanog dinamičkog tlaka u bušotini  $p_{wf} = 99,70 \text{ bar}$  sukladno obrascu (3.84) jednako je:

$$\sigma_{ff} = G_f TVD - p_{wf} = 0,161 \frac{\text{bar}}{\text{m}} \times 1357,32 \text{ m} - 99,70 \text{ bar} = 118,83 \text{ bar},$$

- b. za teoretski najgori uvjet naprezanja u frakturi, a to je za dinamički tlak 0, korekcija vrijednosti propusnosti iznosi:

$$\sigma_{ff} = G_f TVD - p_{wf} = 0,161 \frac{\text{bar}}{\text{m}} \times 1357,32 \text{ m} - 0 \text{ bar} = 218,53 \text{ bar},$$

- c. tablica 1. daje pregled korigiranih vrijednosti apsolutne propusnosti mjerene u laminarnim uvjetima protoka u odnosu na aktualni uvjet naprezanja u frakturi. Za potrebe ovog računa uzeti će se teoretski najbolji uvjet naprezanja u frakturi  $218,53 \text{ bar}$ . Za podupirač Econoprop 30/50 očitana korigirana vrijednost apsolutne propusnosti iznosi  $k_f = 180000 \text{ mD}$ ,

- d. budući da je ovo početni uvjet (iteracija 1) tada vrijedi:

$$N_{\text{Re}} = 0 \Rightarrow k_{f,ef} = \frac{k_f}{1+0} = 180000 \text{ mD}.$$

- 5) Uvrštenjem efektivne propusnost frakture  $k_{f,ef}$  u obrazac (3.63) broj podupirača  $N_{prop}$  za vrijednost početnog Reynoldsovog broja iznosi:

$$N_{prop} = \frac{2k_{f,ef} V_{prop-2krila}}{k_g V_R} = \frac{2 \times 180000 \text{ mD} \times 2,131 \text{ m}^3}{6,04 \text{ mD} \times 1139020 \text{ m}^3} = 0,111479.$$

- 6) Uvrštenjem broja podupirača  $N_{prop}$  u obrazac (3.65) računa se maksimalno mogući bezdimenzijski indeks proizvodnosti  $J_{fD,max}$  te u obrazac (3.66) optimalna bezdimenzijska provodljivost frakture  $C_{fD,opt}$ . Budući da je broj podupirača

$$N_{prop} > 0,1 \quad \text{slijedi:}$$

$$J_{fD,max} = \frac{6}{\pi} - \exp \left[ \frac{0,423 - 0,311 \times 0,113104 - 0,089 (0,111479)^2}{1 + 0,667 \times 0,113104 + 0,015 \ln(0,111479)^2} \right] = 0,441794,$$

$$C_{fD,opt} = 1,6 + \exp \left[ \frac{-0,538 + 1,48 \ln(0,111479)}{1 + 0,142 \ln(0,111479)} \right] = 1,6041.$$

- 7) Temeljem obrazaca (3.68) i (3.69) računa se optimalna poluduljina frakture  $x_{f,opt}$  i optimalna širina frakture  $w_{opt}$  koje iznose:

$$x_{f,opt} = \left( \frac{\left( \frac{V_{prop-2krila}}{2} \right) k_{f,ef}}{C_{fD,opt} h_{ef} k_g} \right)^{1/2} = \left( \frac{\left( \frac{2,131 m^3}{2} \right) \times 180000 mD}{1,6041 \times 4,03 m \times 6,04 mD} \right)^{1/2} = 70,09 m ,$$

$$w_{opt} = \left( \frac{C_{fD,opt} \left( \frac{V_{prop-2krila}}{2} \right) k_g}{h_{ef} k_{f,ef}} \right)^{1/2} =$$

$$= \left( \frac{1,6041 \times \left( \frac{2,131 m^3}{2} \right) \times 6,04 mD}{4,03 m \times 180000 mD} \right)^{1/2} = 0,003775 m$$

8) Sukladno obrascu (3.70) *skin* uslijed oštećenja lica frakture  $s_{ff}$  iznosi:

$$s_{ff} = \frac{\pi w_s}{2 x_{f,opt}} \left( \frac{k_g}{k_s} - 1 \right) = \frac{\pi \times 0,3 m}{2 \times 70,09 m} \left( \frac{6,04 mD}{6,04 mD \times 50\%} - 1 \right) = 0,006723 .$$

9) Odstupanja zbog prigušenja frakture u području kontakta s bušotinom (pribušotinskoj zoni frakture) računaju se preko *skina* uslijed prigušenja frakture  $s_{ck,w}$  i  $s_{ck,k}$  sukladno obrascima (3.74) i/ili (3.75). Budući da se ne pretpostavlja suženje frakture već samo smanjenje propusnosti u pribušotinskoj zoni za 50% vrijednost ovog oštećenje je jednaka:

$$s_{ck,k} = \frac{\pi x_{ck}}{x_{f,opt}} \left( \frac{k_{f,ef}}{k_{f,ef} \times 50\%} - 1 \right) = \frac{\pi \times 0,3 m}{70,09 m} \left( \frac{180000 mD}{180000 mD \times 50\%} - 1 \right) = 0,013447 .$$

10) Temeljem obrasca (3.76) bezdimenzijski indeks proizvodnosti  $J_{fD}$  koji uvažava izračunata odstupanja kroz frakturu i u pribušotinskoj zoni frakture iznosi:

$$J_{fD} = \frac{1}{\frac{1}{J_{fD,max}} + s_{ff} + s_{ck,k}} = \frac{1}{\frac{1}{0,441794} + 0,006723 + 0,013447} = 0,43789 .$$

11) Za pretpostavljeni dinamički tlak u bušotini  $p_{wf} = 99,70 bar$  potrebno je izračunati protok plina. Srednji viskozitet plina  $\bar{\mu}_g$  izračunat je pomoću Carr-Kobayashi-Burrowsove korelacije, dok je faktor kompresibiliteta plina  $\bar{Z}$  izračunat pomoću Brill & Beggs korelacije. Ove vrijednosti računate su kod srednjeg tlaka:

$\left[ (\bar{P}_R + P_{wf}) / 2 \right]_{apsolutno} = 122,785 \text{ bar} + 1,01325 \text{ bar}$  i ležišne temperature  $30^\circ\text{C}$  odnosno,  $T_R = 303,15 \text{ K}$ .

12) Potrebno je izračunati linearnu brzinu plina kod uvjeta dinamičkog tlaka na dnu bušotine  $P_{wf} = 99,70 \text{ bar}$  (kod apsolutne vrijednosti dinamičkog tlaka  $P_{wf,apsolutno} = 99,70 \text{ bar} + 1,01325 \text{ bar}$ ,  $Z_{wf} = 0,848919$ ;  $\mu_{g,wf} = 0,013939 \text{ mPa s}$ ), u punoj visini frakture  $h_f$  kako slijedi:

a. volumetrijski faktor za plin:

$$B_{g,wf} = \frac{P_{SC}}{T_{SC}} \frac{Z_{wf} T_R}{P_{wf,apsolutno}} = \frac{1,01325 \text{ bar}}{288,15 \text{ K}} \frac{0,848919 \times 303,15 \text{ K}}{99,70 \text{ bar} + 1,01325 \text{ bar}} = 0,008985 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$$

b. gustoću plina:

$$\rho_{g,wf} = \frac{P_{wf,apsolutno} M_z \gamma_g}{Z_{wf} R T_R} = \frac{(99,70 \text{ bar} + 1,01325 \text{ bar}) \times 0,028964 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \times 0,5571}{0,848919 \times 8,3145 \frac{\text{J}}{\text{K mol}} \times 303,15 \text{ K}} = 75,948 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

c. linearna brzina plina u frakturi tada je jednaka:

$$v_{g,wf} = \frac{B_{g,wf} q_{gSC}}{h_f W_{opt}} = \frac{0,008985 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \times 245292 \frac{\text{m}^3}{\text{dan}} \times \frac{1}{86400} \frac{\text{dan}}{\text{s}}}{8,17 \text{ m} \times 0,003775 \text{ m}} = 0,827223 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

13) Sukladno obrascu (3.85) potrebno je izračunati faktor turbulencije  $\beta$  ili ga očitati iz tablica proizvođača podupirača, uvažavajući pri tome vrijednost efektivnog naprezanja koje djeluje na podupirač frakture  $\sigma_{ff}$ . U ovom slučaju proizvođač je za podupirač Econoprop 30/50 dao zavisnost  $\beta$  o efektivnom naprezanju u frakturi. Tablica 1. prikazuje taj odnos gdje za  $\sigma_{ff} = 218,53 \text{ bar}$  odnosni faktor turbulencije iznosi  $\beta = 40\,530 \text{ m}^{-1}$ .

14) Izračunati faktor oštećenja  $F$  zbog oštećenja uzrokovanog eventualnim ostacima gela u frakturi sukladno obrascu (3.90). Za pretpostavljeno oštećenje od 10% faktor oštećenja  $F$  iznosi:  $F = 10^{\frac{\% \text{ oštećenja}}{100}} = 10^{\frac{10}{100}} = 1,258925$ .

15) Izvršiti korekciju faktora turbulencije  $\beta$  kroz modificirani faktor turbulencije  $\beta'$  prema obrascu (3.89):  $\beta' = F\beta = 1,258925 \times 40530 \text{ m}^{-1} = 51024 \text{ m}^{-1}$ .

16) Izračunati vrijednost novog Reynolds-ova broja prema obrascu (3.95):

$$N_{\text{Re,izračunati}} = \frac{k_{f,ef} \beta' \rho_{g,wf} v_{g,wf}}{\mu_{g,wf}}$$

$$= \frac{180000 \text{ mD} \times \frac{0,986923 \times 10^{-15} \text{ m}^2}{\text{mD}} \times 51024 \text{ m}^{-1} \times 75,948 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,827223 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,013939 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}}$$

$$= 41,3953$$

17) Izračunati vrijednost pogreške procjene Reynoldsova broja prema obrascu (3.96). Postupak je ovdje ponavljan dodatno još u četiri koraka s pretpostavljenim vrijednostima  $N_{\text{Re,pretpostavljeni}} = 1, 2, 3$ , da bi konačno rješenje uslijedilo za  $N_{\text{Re,pretpostavljeni}} = 3,4742$ . Iterativni postupak proveden je u računalnom tabličnom kalkulatoru.

U nastavku je prikazana završna iteracija koja započinje s korakom 3.

3. iteracija 5,  $N_{\text{Re,pretpostavljeni}} = 3,4742$ ;

$$4. k_{f,ef} = \frac{k_f}{1 + N_{\text{Re,pretpostavljeni}}} = \frac{180000 \text{ mD}}{1 + 3,4742} = 40230 \text{ mD},$$

$$5. N_{prop} = \frac{2k_{f,ef} V_{prop-2krila}}{k_g V_R} = \frac{2 \times 40230 \text{ mD} \times 2,131 \text{ m}^3}{6,04 \text{ mD} \times 1\,139\,020 \text{ m}^3} = 0,024916,$$

$$6. J_{fD,max} = \frac{1}{0,990 - 0,5 \ln(N_{prop})} = \frac{1}{0,990 - 0,5 \ln(0,024916)} = 0,352594,$$

$$C_{fD,opt} = 1,6,$$

$$7. x_{f,opt} = \left( \frac{\left( \frac{V_{prop-2krila}}{2} \right) k_{f,ef}}{C_{fD,opt} h_{ef} k_g} \right)^{1/2} = \left( \frac{\left( \frac{2,131 \text{ m}^3}{2} \right) \times 40230 \text{ mD}}{1,6 \times 4,03 \text{ m} \times 6,04 \text{ mD}} \right)^{1/2} = 33,18 \text{ m},$$



$$w_{opt} = \left( \frac{C_{fD,opt} \left( \frac{V_{prop-2krila}}{2} \right) k_g}{h_{ef} k_{f,ef}} \right)^{1/2} =$$

$$= \left( \frac{1,6 \times 4,03 \text{ m} \times \left( \frac{2,132 \text{ m}^3}{2} \right) \times 6,04 \text{ mD}}{4,03 \text{ m} \times 40230 \text{ mD}} \right)^{1/2} = 0,007974 \text{ m} = 7,974 \text{ mm}$$

$$8. \quad s_{ff} = \frac{\pi w_s}{2 x_{f,opt}} \left( \frac{k_g}{k_s} - 1 \right) = \frac{\pi \times 0,3 \text{ m}}{2 \times 33,18 \text{ m}} \left( \frac{6,04 \text{ mD}}{6,04 \text{ mD} \times 50\%} - 1 \right) = 0,014204,$$

$$9. \quad s_{ck,k} = \frac{\pi x_{ck}}{x_{f,opt}} \left( \frac{k_{f,ef}}{k_{f,ef} \times 50\%} - 1 \right) = \frac{\pi \times 0,3 \text{ m}}{2 \times 33,18 \text{ m}} \left( \frac{40230 \text{ mD}}{40230 \text{ mD} \times 50\%} - 1 \right) = 0,028407,$$

$$10. \quad J_{fD} = \frac{1}{\frac{1}{J_{fD,max}} + s_{ff} + s_{ck,k}} = \frac{1}{\frac{1}{0,352594} + 0,014204 + 0,028407} = 0,347375,$$

$$q_{gSC} = \frac{T_{SC}}{p_{SC}} \frac{\pi k_g h_{ef} (\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2)}{T_R \bar{\mu}_g \bar{Z}} J_{fD} =$$

$$= \frac{288,15 \text{ K}}{101325 \text{ Pa}} \times$$

$$11. \quad \pi \times 6,04 \text{ mD} \times \frac{0,986923 \times 10^{-15} \text{ m}^2}{\text{mD}} \times 4,03 \text{ m} \times \left[ \left( 145,87 \text{ bar} \times \frac{10^5 \text{ Pa}}{\text{bar}} \right)^2 - \left( 99,70 \text{ bar} \times \frac{10^5 \text{ Pa}}{\text{bar}} \right)^2 \right] \times$$

$$\times \frac{303,15 \text{ K} \times 0,014921 \times 10^{-3} \text{ Pa s} \times 0,829865}{303,15 \text{ K} \times 0,014921 \times 10^{-3} \text{ Pa s} \times 0,829865}$$

$$\times 0,347375 \times 86400 \frac{\text{s}}{\text{dan}} = 194\,587 \frac{\text{m}^3}{\text{dan}}$$

$$12. \quad v_{g,wf} = \frac{B_{g,wf} q_{gSC}}{h_f w_{opt}} = \frac{0,008985 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \times 194\,587 \frac{\text{m}^3}{\text{dan}} \times \frac{1}{86400} \frac{\text{dan}}{\text{s}}}{8,17 \text{ m} \times 0,007974 \text{ m}} = 0,310635 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$13. \quad \beta = 40\,530 \text{ m}^{-1},$$

$$14. \quad F = 10^{\frac{\% \text{ oštećenja}}{100}} = 10^{\frac{10}{100}} = 1,258925,$$

$$15. \quad \beta' = F \beta = 1,258925 \times 40\,530 \text{ m}^{-1} = 51\,024 \text{ m}^{-1},$$

$$N_{\text{Re,izračunati}} = \frac{k_{f,ef} \beta' \rho_{g,wf} v_{g,wf}}{\mu_{g,wf}}$$

$$16. = \frac{40230 \text{ mD} \times \frac{0,986923 \times 10^{-15} \text{ m}^2}{\text{mD}} \times 51024 \text{ m}^{-1} \times 75,948 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,310635 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,013939 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}},$$

$$= 3,4743$$

$$17. \text{ pogreška} = \frac{|3,4743 - 3,4742|}{3,4742} \times 100 = 0,001\% .$$

Sukladno obrascu (3.98) ekvivalentni ukupni *skin* efekt kao posljedica frakturiranja  $s_{f,uk}$  za dinamički tlak u bušotini  $p_{wf} = 99,70 \text{ bar}$  jednak je:

$$18. s_{f,uk} = \frac{1}{J_{fD}} - \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} \right] = \frac{1}{0,347375} - \left[ \ln \left( \frac{300 \text{ m}}{0,10795 \text{ m}} \right) - \frac{3}{4} \right] = -4,301135 ,$$

a relativno povećanja indeksa proizvodnosti u odnosu na izvedeno stanje bušotine (stimulacijski efekt frakturiranja) prema obrascu (3.52) tada je jednako:

$$19. FOI = \frac{J_{fD}}{J_{sD}} = \frac{\ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + s_{t,WT}}{\ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + s_{f,uk}} = \frac{\ln \left( \frac{300 \text{ m}}{0,10795 \text{ m}} \right) - \frac{3}{4} - 0,92}{\ln \left( \frac{300 \text{ m}}{0,10795 \text{ m}} \right) - \frac{3}{4} - 4,301135} = 2,175 .$$

Jednom kada je određena optimalna geometrija frakture koja će dati maksimalni indeks proizvodnosti, postupak se u punom rasponu dinamičkih tlakova u bušotini ponavlja za konstantne vrijednosti optimalne poluduljine frakture  $x_{f,opt} = 33,18 \text{ m}$  i optimalne širine frakture  $w_{opt} = 7,974 \text{ mm}$ . Ovdje se bezdimenzijska provodljivost frakture  $C_{fD}$  računa prema obrascu (3.97). Bezdimenzijski indeks proizvodnosti  $J_{fD}$  računa se sukladno obrascu (3.50), odnosno (3.76), a uz pomoć funkcije  $f(C_{fD})$  definirane obrascem (3.48). U nastavku je prikazana završna iteracija za vrijednost dinamičkog tlaka  $p_{wf} = 99,70 \text{ bar}$  koja započinje s korakom 3:

$$3. N_{\text{Re,pretpostavljeni}} = 3,4743 ,$$

$$4. k_{f,ef} = \frac{k_f}{1 + N_{\text{Re,pretpostavljeni}}} = \frac{180000 \text{ mD}}{1 + 3,4743} = 40230 \text{ mD} ,$$

$$5. N_{prop} = \frac{2k_{f,ef} V_{prop-2krila}}{k_g V_R} = \frac{2 \times 40230 \text{ mD} \times 2,131 \text{ m}^3}{6,04 \text{ mD} \times 1\,139\,020 \text{ m}^3} = 0,024916,$$

$$6. C_{fD} = \frac{k_{f,ef} w_{opt}}{k_g x_{f,opt}} = \frac{40230 \text{ mD} \times 0,007974 \text{ m}}{6,04 \text{ mD} \times 33,18 \text{ m}} = 1,6,$$

$$7. f(C_{fD}) = \frac{1,65 - 0,328 \ln(C_{fD}) + 0,116 \ln(C_{fD})^2}{1 + 0,18 \ln(C_{fD}) + 0,064 \ln(C_{fD})^2 + 0,005 \ln(C_{fD})^3} =$$

$$= \frac{1,65 - 0,328 \ln(1,6) + 0,116 \ln(1,6)^2}{1 + 0,18 \ln(1,6) + 0,064 \ln(1,6)^2 + 0,005 \ln(1,6)^3} = 1,384091$$

$$8. s_f = f(C_{fD}) - \ln\left(\frac{x_{f,opt}}{r_w}\right) = 1,384091 - \ln\left(\frac{33,18 \text{ m}}{0,10795 \text{ m}}\right) = -4,343871,$$

$$9. J_{fD,f} = \frac{1}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + s_f} = \frac{1}{\ln\left(\frac{300 \text{ m}}{0,10795 \text{ m}}\right) - \frac{3}{4} - 4,343871} = 0,352609,$$

$$10. s_{ff} = \frac{\pi w_s}{2 x_{f,opt}} \left(\frac{k_g}{k_s} - 1\right) = \frac{\pi \times 0,3 \text{ m}}{2 \times 33,18 \text{ m}} \left(\frac{6,04 \text{ mD}}{6,04 \text{ mD} \times 50\%} - 1\right) = 0,014204,$$

$$11. s_{ck,k} = \frac{\pi x_{ck}}{x_{f,opt}} \left(\frac{k_{f,ef}}{k_{f,ef} \times 50\%} - 1\right) = \frac{\pi \times 0,3 \text{ m}}{2 \times 33,18 \text{ m}} \left(\frac{40230 \text{ mD}}{40230 \text{ mD} \times 50\%} - 1\right) = 0,028407,$$

$$12. J_{fD} = \frac{1}{\frac{1}{J_{fD,max}} + s_{ff} + s_{ck,k}} = \frac{1}{0,352609 + 0,014204 + 0,028407} = 0,347390,$$

$$13. q_{gSC} = \frac{T_{SC}}{p_{SC}} \frac{\pi k_g h_{ef} (\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2)}{T_R \bar{\mu}_g \bar{Z}} J_{fD} =$$

$$= \frac{288,15 \text{ K}}{101325 \text{ Pa}} \times$$

$$\frac{\pi \times 6,04 \text{ mD} \times \frac{0,986923 \times 10^{-15} \text{ m}^2}{\text{mD}} \times 4,03 \text{ m} \times \left[ \left(145,87 \text{ bar} \times \frac{10^5 \text{ Pa}}{\text{bar}}\right)^2 - \left(99,70 \text{ bar} \times \frac{10^5 \text{ Pa}}{\text{bar}}\right)^2 \right]}{303,15 \text{ K} \times 0,014921 \times 10^{-3} \text{ Pa s} \times 0,829865} \times$$

$$\times 0,347390 \times 86400 \frac{\text{s}}{\text{dan}} = 194\,596 \frac{\text{m}^3}{\text{dan}}$$

$$14. v_{g,wf} = \frac{B_{g,wf} q_{gSC}}{h_f w_{opt}} = \frac{0,008985 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \times 194\,596 \frac{\text{m}^3}{\text{dan}} \times \frac{1}{86400} \frac{\text{dan}}{\text{s}}}{8,17 \text{ m} \times 0,007974 \text{ m}} = 0,310648 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$15. \beta = 40\,530 \text{ m}^{-1},$$

$$16. F = 10^{\frac{\% \text{ oštećenja}}{100}} = 10^{\frac{10}{100}} = 1,258925,$$

$$17. \beta' = F\beta = 1,258925 \times 40530 \text{ m}^{-1} = 51024 \text{ m}^{-1},$$

$$N_{\text{Re, izračunati}} = \frac{k_{f,ef} \beta' \rho_{g,wf} v_{g,wf}}{\mu_{g,wf}}$$

$$18. = \frac{40230 \text{ mD} \times \frac{0,986923 \times 10^{-15} \text{ m}^2}{\text{mD}} \times 51024 \text{ m}^{-1} \times 75,948 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,310648 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,013939 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}},$$

$$= 3,47435$$

$$19. \text{ pogreška} = \frac{|3,47435 - 3,47430|}{3,47430} \times 100 = 0,0015\%,$$

$$20. s_{f,uk} = \frac{1}{J_{fD}} - \left[ \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} \right] = \frac{1}{0,347390} - \left[ \ln\left(\frac{300 \text{ m}}{0,10795 \text{ m}}\right) - \frac{3}{4} \right] = -4,301260,$$

$$21. FOI = \frac{J_{fD}}{J_{sD}} = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + s_{t,WT}}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + s_{f,uk}} = \frac{\ln\left(\frac{300 \text{ m}}{0,10795 \text{ m}}\right) - \frac{3}{4} - 0,92}{\ln\left(\frac{300 \text{ m}}{0,10795 \text{ m}}\right) - \frac{3}{4} - 4,301260} = 2,175.$$

Tablica 57. i tablica 59. u prilogu 3. daju detaljan prikaz rezultata proračuna za puni raspon dinamičkih tlakova u bušotini.

Na kraju, vrijednosti pojedinih komponenti *skina*, ekvivalentnog linearnog *skina* uslijed frakturiranja  $s_f$  i ekvivalentnog efekta visokih brzina protjecanja fluida u frakturi  $D_f$  dobiveni su linearnom regresijom kako je opisano u poglavlju 3.1.10. Linearna regresija provedena je u ograničenom rasponu proizvodnje od 120 174 m<sup>3</sup>/dan do maksimalne vrijednosti 371 540 m<sup>3</sup>/dan. Razlog tome je dramatično povećanje efektivne propusnosti pri proizvodnji većoj od 120 000 m<sup>3</sup>/dan koja znatno utječe na rezultat i daje nerealno nizak linearni *skin* (odsječak na osi y). Tablica 8. prikazuje zavisnost tlakova u bušotini i proizvodnje plina (indikatorska krivulja dobivena originalnim *UFD* iterativnim postupkom) te izračunate vrijednosti komponenti *skina* za odabrane tlakove u bušotini.  $s_{f,uk} = -4,56$  je ekstrapolirana vrijednost za slučaj kada nema protoka, ostale vrijednosti rezultat su proračuna *UFD* postupka.

Tablica 8. Zavisnost tlakova u bušotini i proizvodnje plina te teoretske vrijednosti komponenti *skina* i efektivnih propusnosti kao posljedice frakturiranja u ležištu PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

$p_{wf}$ (bar)	$q_{gSC,f}$ (m <sup>3</sup> /dan)	$s_{fuk}$	$s_f$	$D_f q_{gSC}$	$k_{f,ef}$ (mD)
145,87	0	-4,56	-4,56	0,000000	180 000
120,00	120 174	-4,41	-4,56	0,147163	50 780
99,70	194 596	-4,30	-4,56	0,258045	40 230
60,00	301 827	-4,17	-4,56	0,390352	31 449
40,00	337 723	-4,13	-4,56	0,431104	29 308
20,00	361 320	-4,10	-4,56	0,460695	27 881
0,00	371 540	-4,08	-4,56	0,474462	27 251

Nakon provedene linearne regresije u spomenutom intervalu, jednadžba pravca ima slijedeći oblik:

$$s_{f,uk} = s_f + D_f q_{gSC} = -4,56 + 1,2813 \times 10^{-6} \left( \frac{m^3}{dan} \right)^{-1} \times q_{gSC} \frac{m^3}{dan}.$$

Kako bi se moglo kvantificirati utjecaj pojedinih komponenata *skina*, linearnih i onih uvjetovanih turbulencijom plina, u analizu je uvedena jednadžba (3.113). Budući da je koeficijent linearnog protoka  $a_f$  jednoznačno određen vrijednošću  $s_f$ , odnosno dobivena vrijednost  $D_f$  određuje vrijednost koeficijenta turbulencije  $b_f$ , ispravnost ovog postupka biti će potvrđena ako se dvije indikatorske krivulje, ona dobivena originalnim *UFD* iterativnim postupkom i krivulje dobivene jednadžbom (3.113) poklapaju s minimalnim vrijednostima pogreške. U nastavku je prikazan izračun koeficijenata  $a_f$  i  $b_f$  za dinamički tlak  $p_{wf} = 99,70 \text{ bar}$ .

Koeficijent linearnog protoka  $a_f$  računa se prema obrascu (3.114):

$$\begin{aligned} a_f &= \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{T_R \bar{\mu}_g \bar{Z}}{\pi k_g h_{ef}} \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + s_f \right] = \\ &= \frac{1,01325 \times 10^5 \text{ Pa}}{288,15 \text{ K}} \times \\ &\times \frac{303,15 \text{ K} \times 0,014954 \times 10^{-3} \text{ Pa s} \times 0,829369}{\pi \times 6,04 \text{ mD} \times \frac{0,986923 \times 10^{-15} \text{ m}^2}{\text{mD}} \times 4,03 \text{ m}} \times \left[ \ln \left( \frac{300 \text{ m}}{0,10795 \text{ m}} \right) - \frac{3}{4} - 4,56 \right], \\ &= 4,5902 \times 10^{13} \text{ Pa}^2 \left( \frac{m^3}{s} \right)^{-1} \end{aligned}$$

a koeficijent turbulencije  $b_f$  prema obrascu (3.115):

$$\begin{aligned}
 b_f &= \frac{p_{SC} T_R \bar{\mu}_g \bar{Z}}{T_{SC} \pi k_g h_{ef}} D_f = \\
 &= \frac{1,01325 \times 10^5 Pa}{288,15 K} \times \\
 &\times \frac{303,15 K \times 0,014954 \times 10^{-3} Pa s \times 0,829369}{\pi \times 6,04 m D \times \frac{0,986923 \times 10^{-15} m^2}{mD} \times 4,03 m} \times 1,2813 \times 10^{-6} \left( \frac{m^3}{dan} \right)^{-1} \times 86400 \frac{s}{dan} \\
 &= 1,9392 \times 10^{12} Pa^2 \left( \frac{m^3}{s} \right)^{-2}
 \end{aligned}$$

Rješenje kvadratne jednadžbe je proizvodnja plina pri uvjetima dinamičkog tlaka u bušotini  $p_{wf} = 99,70 bar$ :

$$\begin{aligned}
 q_{gSC,f} &= \frac{\sqrt{a^2 + 4b[\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2]} - a}{2b} = \\
 &= \frac{\sqrt{\left( 4,59 \times 10^{13} Pa^2 \left( \frac{m^3}{s} \right)^{-1} \right)^2 + 4 \times 1,94 \times 10^{12} Pa^2 \left( \frac{m^3}{s} \right)^{-2} \times \left[ \left( 145,87 bar \times \frac{10^5 Pa}{bar} \right)^2 - \left( 99,70 bar \times \frac{10^5 Pa}{bar} \right)^2 \right] - 4,59 \times 10^{13} Pa^2 \left( \frac{m^3}{s} \right)^{-1}}{2 \times 1,94 \times 10^{12} Pa^2 \left( \frac{m^3}{s} \right)^{-2}} \\
 &\times 86400 \frac{s}{dan} = 194\ 846 \frac{m^3}{dan}
 \end{aligned}$$

Bezdimenzijski indeks proizvodnosti pri razmatranom dinamičkom tlaku tada je jednak:

$$\begin{aligned}
 J_{fD} &= \frac{1}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + s_f + D_f q_{gSC,f}} = \\
 &= \frac{1}{\ln\left(\frac{300 m}{0,10795 m}\right) - \frac{3}{4} - 4,56 + 1,2813 \times 10^{-6} \left( \frac{m^3}{dan} \right)^{-1} \times 194\ 846 \frac{m^3}{dan}} = 0,348405
 \end{aligned}$$

a dobitak na proizvodnosti u odnosu na konvencionalno opremljenu bušotinu (trenutno stanje) iznosi:

$$FOI = \frac{J_{fD}}{J_{sD}} = \frac{0,348405}{\ln\left(\frac{300 m}{0,10795 m}\right) - \frac{3}{4} - 0,92} = 2,18$$

Ukupni *skin* efekt jednak je:

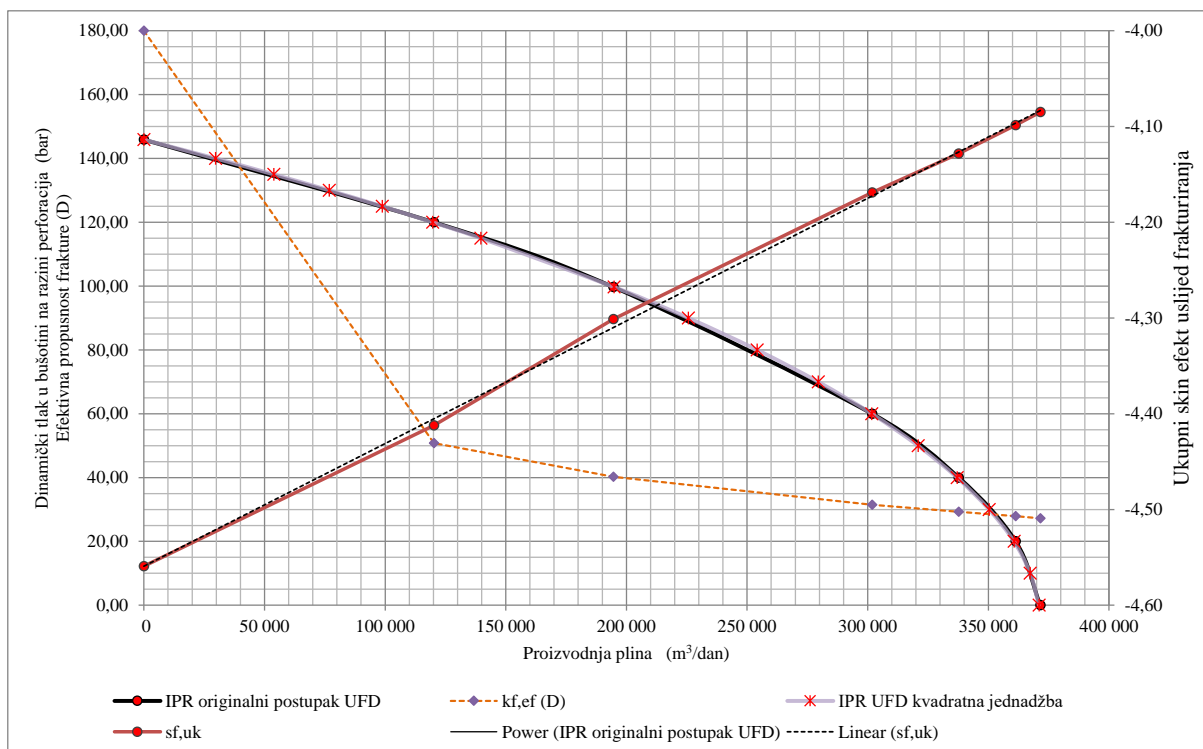
$$s_{f,uk} = s_f + D_f q_{gSC,f} = -4,56 + 1,2813 \times 10^{-6} \left( \frac{m^3}{dan} \right)^{-1} \times 194\ 846 \frac{m^3}{dan} = -4,31.$$

Tablica 9. prikazuje rezultate proračuna proizvodnosti idealno frakturiranog ležišta PLQ-F uporabom jednadžbe (3.113) za puni raspon dinamičkih tlakova u bušotini.

Tablica 9. Rezultati proračuna proizvodnosti idealno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir uporabom jednadžbe (3.113).

$P_{wf}$ (bar)	$\bar{\mu}_g$ (mPa s)	$\bar{Z}$	$s_f$	$D_f$ (m <sup>3</sup> /dan) <sup>-1</sup>	$s_{f,uk}$	$a_f$ (Pa <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> /s) <sup>-1</sup> )	$b_f$ (Pa <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> /s) <sup>-2</sup> )	$q_{gSC,f}$ (m <sup>3</sup> /dan)	$J_{FD}$	FOI
0,00	0,012882	0,879841	-4,56	1,2813E-06	-4,08	4,1947E+13	1,7720E+12	370 983	0,323007	2,02
10,00	0,013066	0,873246	-4,56	1,2813E-06	-4,09	4,2227E+13	1,7839E+12	367 342	0,323494	2,03
20,00	0,013253	0,866935	-4,56	1,2813E-06	-4,10	4,2522E+13	1,7963E+12	360 631	0,324396	2,03
30,00	0,013466	0,860952	-4,56	1,2813E-06	-4,11	4,2910E+13	1,8127E+12	350 315	0,325793	2,04
40,00	0,013680	0,855303	-4,56	1,2813E-06	-4,13	4,3305E+13	1,8294E+12	337 060	0,327606	2,05
50,00	0,013893	0,850016	-4,56	1,2813E-06	-4,15	4,3707E+13	1,8464E+12	320 865	0,329848	2,06
60,00	0,014107	0,845075	-4,56	1,2813E-06	-4,17	4,4122E+13	1,8639E+12	301 676	0,332545	2,08
70,00	0,014320	0,840526	-4,56	1,2813E-06	-4,20	4,4548E+13	1,8819E+12	279 461	0,335723	2,10
80,00	0,014534	0,836370	-4,56	1,2813E-06	-4,23	4,4989E+13	1,9006E+12	254 149	0,339419	2,12
90,00	0,014747	0,832624	-4,56	1,2813E-06	-4,27	4,5443E+13	1,9198E+12	225 653	0,343678	2,15
99,70	0,014954	0,829369	-4,56	1,2813E-06	-4,31	4,5902E+13	1,9392E+12	194 846	0,348405	2,18
115,00	0,015280	0,825045	-4,56	1,2813E-06	-4,38	4,6659E+13	1,9711E+12	139 594	0,357216	2,24
120,00	0,015387	0,823836	-4,56	1,2813E-06	-4,41	4,6917E+13	1,9820E+12	119 661	0,360505	2,26
125,00	0,015494	0,822737	-4,56	1,2813E-06	-4,43	4,7180E+13	1,9931E+12	98 756	0,364020	2,28
130,00	0,015601	0,821742	-4,56	1,2813E-06	-4,46	4,7447E+13	2,0044E+12	76 837	0,367780	2,30
135,00	0,015729	0,820851	-4,56	1,2813E-06	-4,49	4,7786E+13	2,0187E+12	53 787	0,371819	2,33
140,00	0,015860	0,820065	-4,56	1,2813E-06	-4,52	4,8136E+13	2,0335E+12	29 689	0,376137	2,35
145,87	0,016014	0,819267	-4,56	1,2813E-06	-4,56	4,8555E+13	2,0512E+12	0	0,381597	2,39

Slika 30. prikazuje indikatorsku krivulju dobivenu originalnim *UFD* iterativnim postupkom te indikatorsku krivulju koja se temelji na prikazanom regresijskom postupku. Tu je također prikazana krivulja ovisnosti efektivne propusnosti frakture  $k_{f,ef}$  o protoku plina te pravac linearne regresije. Vidi se da je preklapanje dviju indikatorskih krivulja vrlo dobro po čitavom razvoju. Odstupanje kod razmatranog dinamičkog tlaka 99,70 bar je u odnosu na *UFD* model 250 m<sup>3</sup>/dan (194 846 m<sup>3</sup>/dan – 194 596 m<sup>3</sup>/dan) plina ili 0,1%. Ovim vrijednostima potvrđena je valjanost prikazanog postupka.



Slika 30. Indikatorska krivulja idealno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir i pravac linearne regresije ovisnosti ukupnog *skina* uslijed frakturiranja o veličini protoka plina.

U nastavku je prikazan proračun linearnih i nelinearnih oštećenja koja se događaju u perforacijama i anularnom pješčanom zasipu. Tablica 10. prikazuje ulazne parametre za proračun oštećenja kao posljedice protjecanja plina u perforacijama.

Tablica 10. Ulazni parametri za proračun oštećenja kao posljedice protjecanja plina u perforacijama ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

Unutarnji promjer proizvodne kolone zaštitnih cijevi	$r_c$	m	0,0797
Visina perforacija	$h_p$	m	8,00
Gustoća perforiranja		perf./m	39,00
Broj perforacija	$n_p$		312,00
Duljina perforacije (promjer dlijeta - unutarnji promjer proiz. kolone)	$L_p$	m	0,1362
Promjer perforacija	$D_p$	m	0,0211
Efektivna propusnost za plin podupirača u perforacijama	$k_G$	mD	180000
Faktor turbulencije u perforacijama	$\beta_G$	$m^{-1}$	40530

Linearni *skin* efekt uslijed linearnog protjecanja u perforacijama  $s_G$  jednak je:

$$s_G = \frac{8 k_g h_{ef}}{k_G n_p D_p^2} L_p = \frac{8 \times 6,04 \text{ mD} \times 4,03 \text{ m} \times 0,1362 \text{ m}}{180000 \text{ mD} \times 312 \times 0,0211^2 \text{ m}^2} = 0,00106.$$

Odgovarajući efekt visokih brzina protjecanja plina u perforacijama  $D_G$  jednak je:



$$D_G = \beta_G \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{32 k_g h_{ef}}{n_p^2 D_p^4 \pi} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{1}{\mu_{g,wf}} L_p$$

$$= \frac{40\,530\,m^{-1} \times 0,028964 \frac{kg}{mol} \times 0,5571 \times 32 \times 6,04\,mD \times \frac{0,986923 \times 10^{-15}\,m^2}{mD} \times 4,03\,m \times 1,01325 \times 10^5\,Pa \times 0,1362\,m}{8,3145 \frac{J}{K\,mol} \times 312^2 \times 0,0211^4\,m^4 \times \pi \times 288,15\,K \times 0,013939 \times 10^{-3}\,Pa \cdot s}$$

$$\times \frac{1}{86400} \frac{dan}{s} = 3,98 \times 10^{-8} \left( \frac{m^3}{dan} \right)^{-1}$$

Tablica 11. daje pregled ulaznih parametra za proračun oštećenja kao posljedice protjecanja plina u anularnom sustavu pješčanog zasipa.

Tablica 11. Ulazni parametri za proračun oštećenja kao posljedice protjecanja plina u anularnom sustavu pješčanog zasipa ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

Unutarnji promjer proizvodne kolone	$r_c$	m	0,0797
Vertikalna visina filtra	$h_{scr}$	m	12,00
Vanjski promjer filtra	$r_{so}$	m	0,0550
Unutarnji promjer filtra	$r_{si}$	m	0,0445
Efektivna propusnost za plin pijeska-propanta anularnom prostoru	$k_{GP}=k_G$	mD	180000
Faktor turbulencije u anularnom prostoru	$\beta_{GP}=\beta_G$	$m^{-1}$	40530
Efektivna propusnost za plin filtra pješčanog zasipa	$k_s$	mD	180000
Faktor turbulencije u anularnom prostoru	$\beta_{scr}$	$m^{-1}$	40530

Skin efekt uslijed linearnog protjecanja u sustavu anularnog pješčanog zasipa  $S_{GP}$  jednak je:

$$S_{GP} = \frac{k_{ef} h_{ef,g}}{k_G h_{scr}} \left[ \ln \left( \frac{r_c}{r_{si}} \right) + \left( \frac{k_G}{k_s} - 1 \right) \ln \left( \frac{r_{so}}{r_{si}} \right) \right] =$$

$$= \frac{6,04\,mD \times 4,03\,m}{180\,000\,mD \times 12,0\,m} \times \left[ \ln \left( \frac{0,0797\,m}{0,0445\,m} \right) + \left( \frac{180\,000\,mD}{180\,000\,mD} - 1 \right) \ln \left( \frac{0,055\,m}{0,0445\,m} \right) \right] = 0,0000042$$

a odgovarajući efekt visokih brzina protjecanja fluida u sustavu anularnog pješčanog zasipa  $D_{GP}$  jednak je:

$$\begin{aligned}
D_{GP} &= \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{k_g h_{ef}}{2\pi h_{scr}^2 \mu_{g,wf}} \left[ \beta_G \left( \frac{1}{r_{so}} - \frac{1}{r_c} \right) + \beta_{scr} \left( \frac{1}{r_{si}} - \frac{1}{r_{so}} \right) \right] = \\
&= \frac{0,028964 \frac{kg}{mol} \times 0,5571 \times 1,01325 \times 10^5 Pa \times 6,04 mD \times \frac{0,986923 \times 10^{-15} m^2}{mD} \times 4,03 m}{8,3145 \frac{J}{K mol} \times 288,15 K \times 2\pi \times 12^2 \times 0,013939 \times 10^{-3} Pa \cdot s} \times \\
&\times \left[ 40\,530 m^{-1} \left( \frac{1}{0,055} - \frac{1}{0,0797} \right) + 40\,530 m^{-1} \left( \frac{1}{0,0445} - \frac{1}{0,055} \right) \right] \times \frac{1}{86400} \frac{dan}{s} = \\
&= 6,0708 \times 10^{-12} \left( \frac{m^3}{dan} \right)^{-1}
\end{aligned}$$

Linearni *skin* faktor kao posljedica hidrauličkog frakturiranja i primjene tehnike FP tada je jednak:

$$s_{FP} = s_f + s_G + s_{GP} = -4,5593 + 0,00106 + 0,0000042 = -4,5582,$$

a odgovarajući ukupni efekt visokih brzina protjecanja fluida ima vrijednost:

$$\begin{aligned}
D_{FP} &= D_f + D_G + D_{GP} = \\
&= 1,2813 \times 10^{-6} \left( \frac{m^3}{dan} \right)^{-1} + 3,9800 \times 10^{-8} \left( \frac{m^3}{dan} \right)^{-1} + 6,0708 \times 10^{-12} \left( \frac{m^3}{dan} \right)^{-1} = \\
&= 1,3211 \times 10^{-6} \left( \frac{m^3}{dan} \right)^{-1}
\end{aligned}$$

Kako bi bilo moguće valorizirati kombinirani efekt frakturiranja i pješanog zasipa, potrebno je izračunati proizvodnju bušotine pri uvjetima dinamičkog tlaka  $p_{wf} = 99,70 bar$ .

Koeficijent linearnog protoka ovdje je jednak:

$$\begin{aligned}
a_{FP} &= \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{T_R \bar{\mu}_g \bar{Z}}{\pi k_g h_{ef}} \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + s_{FP} \right] = \\
&= \frac{1,01325 \times 10^5 Pa}{288,15 K} \times \\
&\times \frac{303,15 K \times 0,014954 \times 10^{-3} Pa s \times 0,829369}{\pi \times 6,04 mD \times \frac{0,986923 \times 10^{-15} m^2}{mD} \times 4,03 m} \times \left[ \ln \left( \frac{300 m}{0,10795 m} \right) - \frac{3}{4} - 4,5582 \right], \\
&= 4,5921 \times 10^{13} Pa^2 \left( \frac{m^3}{s} \right)^{-1}
\end{aligned}$$

a koeficijent koji opisuje efekt visokih brzina protjecanja ima vrijednost:

$$\begin{aligned}
b_{FP} &= \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{T_R \bar{\mu}_g \bar{Z}}{\pi k_g h_{ef}} D_{FP} = \\
&= \frac{1,01325 \times 10^5 \text{ Pa}}{288,15 \text{ K}} \times \\
&\times \frac{303,15 \text{ K} \times 0,014954 \times 10^{-3} \text{ Pa s} \times 0,829369}{\pi \times 6,04 \text{ mD} \times \frac{0,986923 \times 10^{-15} \text{ m}^2}{\text{mD}} \times 4,03 \text{ m}} \times 1,3211 \times 10^{-6} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{dan}} \right)^{-1} \times 86400 \frac{\text{s}}{\text{dan}} \\
&= 1,9994 \times 10^{12} \text{ Pa}^2 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)^{-2}
\end{aligned}$$

Proizvodnja plina pri uvjetima dinamičkog tlaka u bušotini  $p_{wf} = 99,70 \text{ bar}$  iznosi:

$$\begin{aligned}
q_{gSC,FP} &= \frac{\sqrt{a^2 + 4b[\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2]} - a}{2b} = \\
&= \frac{\sqrt{\left( 4,59 \times 10^{13} \text{ Pa}^2 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)^{-1} \right)^2 + 4 \times 2,00 \times 10^{12} \text{ Pa}^2 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)^{-2} \times \left[ \left( 145,87 \text{ bar} \times \frac{10^5 \text{ Pa}}{\text{bar}} \right)^2 - \left( 99,70 \text{ bar} \times \frac{10^5 \text{ Pa}}{\text{bar}} \right)^2 \right] - 4,59 \times 10^{13} \text{ Pa}^2 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)^{-1}}{2 \times 2,00 \times 10^{12} \text{ Pa}^2 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)^{-2}} \\
&\times 86400 \frac{\text{s}}{\text{dan}} = 194\,298 \frac{\text{m}^3}{\text{dan}}
\end{aligned}$$

Bezdimenzijski indeks proizvodnosti ležišta PLQ-F pri razmatranom dinamičkom tlaku jednak je:

$$\begin{aligned}
J_{D,FP} &= \frac{1}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + s_{FP} + D_{FP} q_{gSC}} = \\
&= \frac{1}{\ln\left(\frac{300 \text{ m}}{0,10795 \text{ m}}\right) - \frac{3}{4} - 4,5582 + 1,3211 \times 10^{-6} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{dan}} \right)^{-1} \times 194\,298 \frac{\text{m}^3}{\text{dan}}} = 0,347425
\end{aligned}$$

a odnosni dobitak na proizvodnosti u odnosu na konvencionalno opremljenu bušotinu iznosi:

$$FOI = \frac{J_{D,FP}}{J_{SD}} = \frac{0,347425}{\frac{1}{\ln\left(\frac{300 \text{ m}}{0,10795 \text{ m}}\right) - \frac{3}{4} - 0,92}} = 2,17$$

Ukupni *skin* efekt jednak je:

$$S_{FP,uk} = S_{FP} + D_{FP} q_{gSC,FP} = -4,5582 + 1,3211 \times 10^{-6} \left( \frac{m^3}{dan} \right)^{-1} \times 194\,298 \frac{m^3}{dan} = -4,30.$$

Tablica 12. prikazuje rezultate proračuna bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti frakturiranog ležišta PLQ-F opremljenog pješćanim zasipom (FP).

Tablica 12. Rezultati proračuna indikatorske krivulje i bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir opremljenog tehnikom FP.

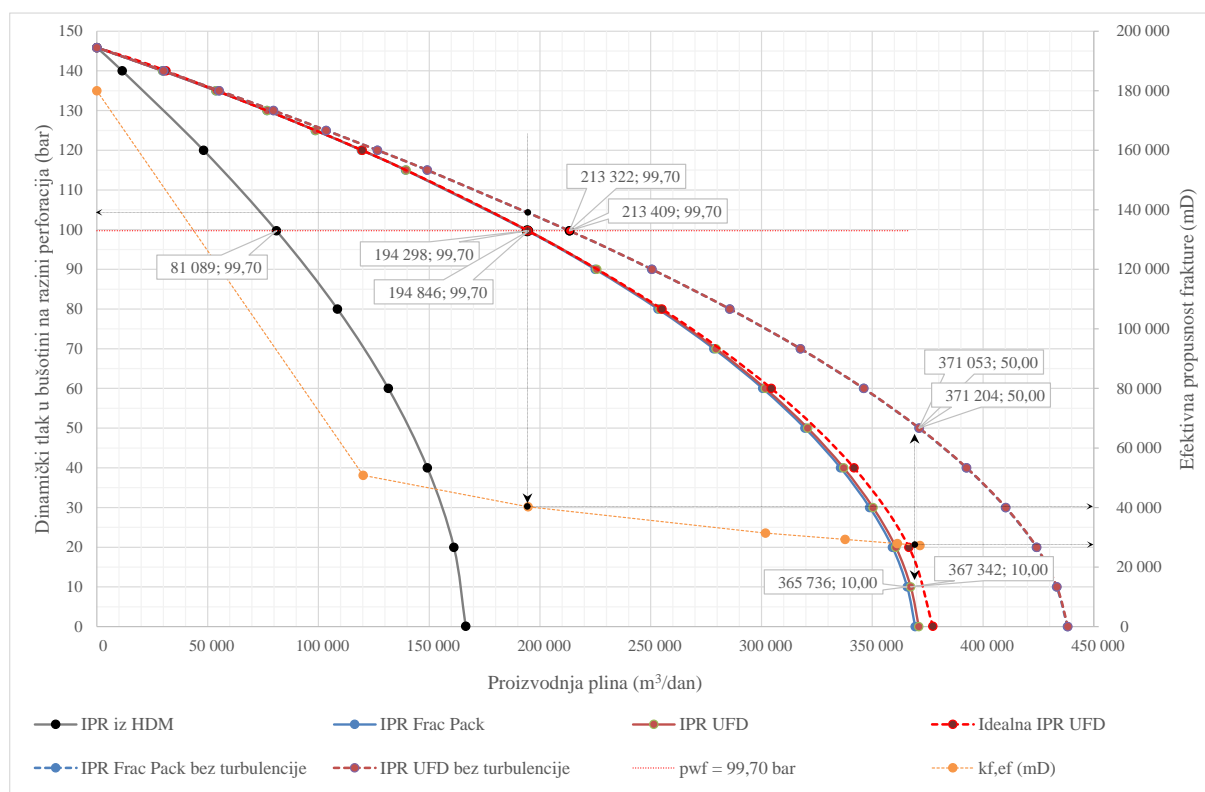
$P_{wf}$	$\bar{\mu}_g$	$\bar{Z}$	$S_{FP}$	$D_{FP}$	$S_{FP,uk.}$	$a_{FP}$	$b_{FP}$	$q_{gSC,FP}$	$J_{D,FP}$	$FOI$
(bar)	(mPa s)			(m <sup>3</sup> /dan) <sup>-1</sup>		(Pa <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> /s) <sup>-1</sup> )	(Pa <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> /s) <sup>-2</sup> )	(m <sup>3</sup> /dan)		
0,00	0,012882	0,879841	-4,56	1,3211E-06	-4,07	4,1964E+13	1,8271E+12	369 351	0,321586	2,01
10,00	0,013066	0,873246	-4,56	1,3211E-06	-4,08	4,2244E+13	1,8393E+12	365 736	0,322080	2,02
20,00	0,013253	0,866935	-4,56	1,3211E-06	-4,08	4,2539E+13	1,8521E+12	359 075	0,322996	2,02
30,00	0,013466	0,860952	-4,56	1,3211E-06	-4,10	4,2927E+13	1,8690E+12	348 832	0,324414	2,03
40,00	0,013680	0,855303	-4,56	1,3211E-06	-4,11	4,3322E+13	1,8862E+12	335 669	0,326254	2,04
50,00	0,013893	0,850016	-4,56	1,3211E-06	-4,14	4,3725E+13	1,9038E+12	319 584	0,328532	2,06
60,00	0,014107	0,845075	-4,56	1,3211E-06	-4,16	4,4140E+13	1,9218E+12	300 522	0,331273	2,07
70,00	0,014320	0,840526	-4,56	1,3211E-06	-4,19	4,4566E+13	1,9404E+12	278 447	0,334505	2,09
80,00	0,014534	0,836370	-4,56	1,3211E-06	-4,22	4,5007E+13	1,9596E+12	253 286	0,338266	2,12
90,00	0,014747	0,832624	-4,56	1,3211E-06	-4,26	4,5462E+13	1,9794E+12	224 948	0,342605	2,14
99,70	0,014954	0,829369	-4,56	1,3211E-06	-4,30	4,5921E+13	1,9994E+12	194 298	0,347425	2,17
115,00	0,015280	0,825045	-4,56	1,3211E-06	-4,37	4,6678E+13	2,0323E+12	139 284	0,356425	2,23
120,00	0,015387	0,823836	-4,56	1,3211E-06	-4,40	4,6936E+13	2,0436E+12	119 424	0,359789	2,25
125,00	0,015494	0,822737	-4,56	1,3211E-06	-4,43	4,7199E+13	2,0550E+12	98 585	0,363389	2,27
130,00	0,015601	0,821742	-4,56	1,3211E-06	-4,46	4,7466E+13	2,0667E+12	76 725	0,367243	2,30
135,00	0,015729	0,820851	-4,56	1,3211E-06	-4,49	4,7805E+13	2,0814E+12	53 724	0,371387	2,32
140,00	0,015860	0,820065	-4,56	1,3211E-06	-4,52	4,8155E+13	2,0967E+12	29 664	0,375824	2,35
145,87	0,016014	0,819267	-4,56	1,3211E-06	-4,56	4,8575E+13	2,1150E+12	0	0,381442	2,39

#### 4.3.5. Diskusija o utjecaju velikih brzina protjecanja plina (turbulencije)

Utjecaj velikih brzina protjecanja plina (turbulencije) na određivanje teoretski optimalne geometrije frakture sagledan je kroz zavisnost brzine plina (proizvodnje) i posljedične veličine efektivne propusnosti frakture. Tablica 9. i tablica 12. prikazuju rezultate proračuna indikatorskih krivulja za idealno frakturirano ležište i ležište opremljeno tehnikom FP. Generirane indikatorske krivulje u oba slučaja uvažavaju efekt turbulencije plina i pješćanog zasipa. Za valorizaciju utjecaja efekta turbulencije, generirane su indikatorske krivulje kod kojih su koeficijenti turbulencije  $b_f$  i  $b_{FP}$  izjednačeni s nulom. Na slici 31. dan je komparativni prikaz indikatorskih krivulja te krivulje efektivnih propusnosti teoretski optimalne frakture. Prikazane su:

- „IPR UFD“, odnosno slučaj idealno frakturiranog ležišta bez utjecaja bušotinskih efekata (zacjevljenja, perforacija, pješćanog zasipa) prema proceduri UFD (tablica 9.);

- „IPR UFD bez turbulencije“, za slučaj gdje je zanemaren utjecaj visokih brzina protjecanja plina i bušotinskih efekata ( $D_f = 0 \Rightarrow b_f = 0$ ), (tablica 9.).
- „IPR UFD Frac Pack“, za slučaj idealno frakturiranog ležišta u zacjevljenom kanalu bušotine s perforacijama i opremljenog pješčanim zasipom (tablica 12.);
- „IPR UFD Frac Pack bez turbulencije“ za slučaj gdje je zanemaren utjecaj visokih brzina protjecanja plina ( $D_{FP} = 0 \Rightarrow b_{FP} = 0$ ), (tablica 12.);
- „kf,ef (mD)“ – krivulja efektivnih propusnosti teoretski optimalne frakture.



Slika 31. Indikatorske krivulje i efektivna propusnost teoretski optimalne frakture ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

Iz slike 31. proizlazi da zanemarivanje utjecaja efekta velikih brzina protjecanja plina ili turbulencije, dovodi do preoptimističnih procjena indeksa proizvodnosti. Davanje frakturiranog ležišta PLQ-F kod razmatranog dinamičkog tlaka u bušotini od 99,70 bar, za slučaj „IPR UFD bez turbulencije“ iznositi će 213 409 m<sup>3</sup>/dan plina. Uvođenjem koncepta efektivne propusnosti frakture u proračun, propusnost će za taj tlak imati 4,5 puta manju vrijednost od deklarirane ili 40 000 mD. Ovo smanjenje za posljedicu ima smanjenu proizvodnju koja se procjenjuje na 194 846 m<sup>3</sup>/dan. Ekvivalentni gubitak tlaka pri tome je 4,59 bar (104,29 bar – 99,70 bar) ili 4,4%.

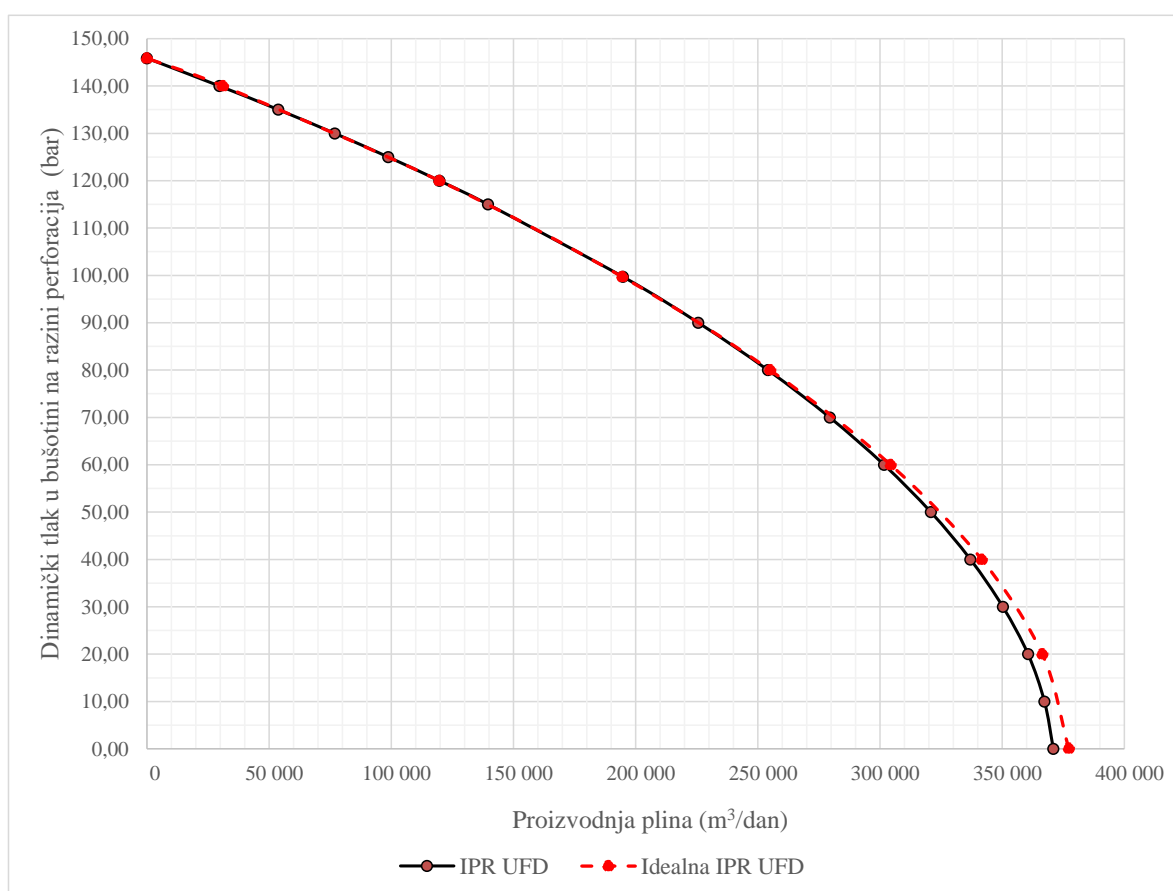
Ovaj gubitak je uzrokovan isključivo protjecanjem plina kroz frakturu u turbulentnom području. Ako se analizira krivulja efektivnih propusnosti frakture, počevši od puštanja bušotine u proizvodnju, efektivna propusnost frakture u početku rapidno pada. Od početnih 180 000 mD pri vrlo malim protocima, sve do 50 780 mD pri protoku plina od 120 174 m<sup>3</sup>/dan. Daljnjim povećanjem depresije, odnosno proizvodnje, smanjenje efektivne propusnosti nije toliko dramatično, ali je još uvijek značajno. Pri apsolutnoj depresiji iznosi svega 27 251 mD. Vrijednost smanjenja efektivne propusnosti u tom je dijelu razvoja krivulje gotovo proporcionalno s povećanjem depresije. Kod proizvodnje plina u rasponu od 365 000 m<sup>3</sup>/dan pa do 370 000 m<sup>3</sup>/dan dodatni gubitak tlaka kreće se oko 40 bar što je 9,35 puta više u odnosu na ranije spomenut slučaj. Efektivna propusnost pri tim uvjetima iznosi približno 27 300 mD. Znači 6,59 puta ili 84,88% manja od deklarirane propusnosti proizvođača kada je svedena na uvjete naprezanja u ležištu. Isti razvoj slijede i krivulje „IPR Frac Pack bez turbulencije“ i „IPR Frac Pack“. Preklapanje krivulja koje isključuju turbulenciju plina je gotovo potpuno što znači da je utjecaj linearnih komponenti *skina* pješčanog zasipa i perforacija zanemariv. Preklapanje krivulja koje uključuju turbulenciju gotovo je potpuno sve do dinamičkog tlaka 70 bar (u području depresije do 50%). Može se zaključiti da se gotovo sav gubitak tlaka, uključujući i onaj zbog turbulencije plina, događa u frakturi. Time je pokazano da je utjecaj pješčanog zasipa na gubitak proizvodnosti ležišta zanemariv. Ovo u konačnosti vodi k zaključku da kod primjene tehnike FP proizvodnost ležišta gotovo u potpunosti ovisi o geometriji frakture i propusnosti utisnutog podupirača. U slučaju zacijevljene bušotine s perforacijama u području ležišta (sadašnje stanje), proizvodnja ostaje na 81 089 m<sup>3</sup>/dan plina (indikatorska krivulja „IPR iz HDM“).

#### 4.3.6. Diskusija o utjecaju „nesavršenosti“ geometrije frakture

Kako je prikazano u prethodnim poglavljima, teoretski optimalna geometrija frakture (njena duljina i širina) određuje se za neki unaprijed određen dinamički tlak u bušotini, odnosno željenu proizvodnju. Međutim, za svaki proizvodni uvjet postoji jedna jedinstvena optimalna geometrija koja daje maksimalno moguć indeks proizvodnosti. Da bi se sagledao utjecaj „nesavršenosti“ odabrane geometrije u odnosu na druge proizvodne uvjete koji se mogu javiti u bušotini, izvršen je proračun tzv. idealne *IPR* krivulje. Proračun je izvršen na način da je za svaki pretpostavljeni dinamički tlak u bušotini, u punom rasponu, određena teoretski optimalna geometrija frakture i izračunati relevantni proizvodni pokazatelji. Sumarni prikaz optimalnih geometrija frakture i relevantnih proizvodnih pokazatelja idealne *IPR* krivulje nalazi se u tablici 13.

Tablica 13. Sumarni prikaz proizvodnih pokazatelja idealne *IPR* krivulje dobivenih iterativnim *UFD* postupkom ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

$P_{wf}$ (bar)	0,10	20,00	40,00	60,00	80,00	99,70	120,00	140,00	145,86
$N_{prop}$	0,018126	0,018472	0,019252	0,020409	0,022218	0,025026	0,030373	0,048201	0,111479
$k_{f,ef}$ (mD)	29 267	29 826	30 888	32 953	35 874	40 409	49 042	77 828	180 000
$C_{fD,opt}$	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
$J_{fD,max}$	0,3339	0,3349	0,3373	0,3406	0,3456	0,3529	0,3654	0,3990	0,4418
$FOI_{max}$	2,09	2,10	2,11	2,13	2,16	2,21	2,29	2,50	2,77
$x_{f,opt}$ (m)	28,30	28,57	29,16	30,03	31,33	33,25	36,63	46,15	70,09
$w_{f,opt}$ (m)	0,009349	0,009261	0,009071	0,008810	0,008444	0,007956	0,007222	0,005733	0,003775
$S_{ff}$	0,0167	0,0165	0,0162	0,0157	0,0150	0,0142	0,0129	0,0102	0,0067
$S_{ck,w}$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$S_{ck,k}$	0,0333	0,0330	0,0323	0,0314	0,0301	0,0283	0,0257	0,0204	0,0134
$J_{fD}$	0,328389	0,329464	0,331834	0,335236	0,340304	0,347653	0,360271	0,394194	0,437892
$S_f$	-4,13	-4,14	-4,17	-4,20	-4,24	-4,30	-4,40	-4,64	-4,90
$FOI$	2,06	2,06	2,08	2,10	2,13	2,18	2,26	2,47	2,74
$q_{gsc,f}$ (m <sup>3</sup> /dan)	372 685	362 002	337 522	300 671	251 945	192 196	118 263	30 790	0
$q_{gsc,HDM}$ (m <sup>3</sup> /dan)	166 462	161 163	149 191	131 553	108 593	81 089	48 148	11 457	0
<b>Pogreška (%)</b>	0,000316	0,000764	0,001649	0,000402	0,001392	0,002095	0,001728	0,001170	0,000000



Slika 32. Komparativni prikaz idealne *IPR* krivulje i *IPR* krivulje određene teoretski optimalnom geometrijom frakture kod  $p_{wf} = 99,70$  bar istražne bušotine SJ – 1 Dir.

Slika 32. daje komparativni prikaz idealne *IPR* krivulje i *IPR* krivulje određene teoretski optimalnom geometrijom frakture kod  $p_{wf} = 99,70$  bar. Vidljivo je da se krivulje u potpunosti preklapaju u više od 60% raspona tlaka. Tek ispod vrijednosti tlaka od 60 bar dolazi do njihova blagog razdvajanja. Budući da se rijetko planira proizvodnja koja bi uvjetovala depresiju veću od 50%, može se zaključiti da je geometrija frakture izračunata za dinamički tlak od 99,70 bar optimalna i za druge uvjete dinamičkog tlaka. Iako se ne očekuju depresije veće od 50%, odstupanja i u preostalom dijelu krivulje kreću se od minimalnih do prihvatljivih.



#### **4.4. Određivanje proizvodnog potencijala tanko proslojenog ležišta PLQ-F razradne bušotine SJ – 2 Dir**

U ovom poglavlju prikazano je određivanja proizvodnog potencijala ležišta PLQ-F sukladno novoj metodologiji. Cilj provedenog istraživanja je izraditi optimalni program hidrauličkog frakturiranja koji će rezultirati globalnim maksimalno mogućim indeksom proizvodnosti. Svrha provedenog istraživanja je utvrditi maksimalno mogući dobitak u proizvodnosti za slučaj da je ležište bilo hidraulički frakturirano prema optimalnom programu izvođenja.

##### 4.4.1. Povijest radova i proizvodnje

Plinsko polje SJ nalazi se oko 75 km jugozapadno od grada Pule i 105 km jugoistočno od grada Ravenne u susjednoj Italiji. Dubina mora je 64 m. Polje je razrađeno s četiri koso usmjerene dvostruko opremljene bušotine iz jedne proizvode platforme SJ. Bušenje i proizvodno opremanje bušotina započeto je u prosincu 2013. godine i završeno je krajem veljače 2014., da bi po završetku izgradnje i instalacije sabirno-transportnog sustava konačno bile puštene u proizvodnju u studenom 2014. godine. Proizvodnja se odvija iz tanko proslojenih ležišta Carola formacije koje karakteriziraju svjetlo-sive i sive, plastične, ljepljive gline, proslojene s nekonsolidiranim finim do vrlo finim uglatim do slabo uglatim, srednje sortiranim dominantno kvarcnim pijeskom. Sva ležišta hidraulički su frakturirana i proizvodno opremljena tehnikom *FP*. Tijekom faze izrade, u otvorenom je kanalu bušotina izvršen širok raspon karotažnih mjerenja. Kako bi se mogle konačno definirati sheme opremanja bušotina izvršena je tzv. „brza petrofizikalna interpretacija“ i zonacija ležišta na svim bušotinama. Dodatno je, kasnije, izvršena *TLA* analiza i detaljna petrofizikalna karakterizacija raskrivenih ležišta u bušotinama SJ – 2 Dir i SJ – 4 Dir. Između ostalih ležišta, detaljna petrofizikalna karakterizacija provedena je i na tanko proslojenom ležištu PLQ-F.

##### 4.4.2. Petrofizikalna karakterizacija ležišta

Petrofizikalna karakterizacija tanko proslojenih ležišta u bušotini SJ – 2 Dir provedena je konvencionalnom *CPI* (engl. *Computer Processing Interpretation*) metodologijom i paralelno e-tlac<sup>®</sup> karakterizacijom tanko proslojenih ležišta (INA-ENI, 2014). Sveobuhvatna analiza pokazala je da su rezultati konvencionalne i e-tlac<sup>®</sup> interpretacije u suglasju s detektiranim pojavama plina tijekom bušenja i karotažnim mjerenjima (INA-ENI, 2014). Srednji porozitet je oko 23 %, zasićenje vodom manje od 65 %, dok se odnos efektivno propusnih tijela naspram ukupne debljine kreće od 17 % do 25 % (INA-ENI, 2014). Za potrebe

ovog istraživanja ekstrapolirani su podaci o zonaciji ležišta te distribucije poroziteta, zasićenja i propusnosti. Izračun distribucije propusnosti temeljen je na provedenim *NMR* mjeranjima sukladno obrascu (2.1). Detaljan prikaz rezultata ekstrapoliranih podataka iz *TLA* analize kao i distribucije propusnosti dan je u tablici 61. priloga 4. Kompozitni dijagram rezultata petrofizikalne *TLA* analize (e-tlac®) šire zone ležišta PLQ-F prikazan je na slici 33., a osrednjene vrijednosti distribucije parametara korištenih za istraživanje prikazane su u tablici 14.

Tablica 14. Osrednjene vrijednosti distribucije petrofizikalnih parametara šire zone ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir (INA-ENI 2014).

Ležište	Grupe proslajaka	SJ – 2 DIR				NTG	Φ	S <sub>w</sub>	k <sub>NMR</sub>
		Podina	Krovina	Podina	Krovina				
		MD (m)	MD (m)	TVDss (m)	TVDss (m)				
PLQ-Int_E1_F	Int_E1_F	1368,5	1371,8	1269,4	1272,4	0,256	0,198	0,604	1,66
PLQ-F	Fa	1371,8	1376,3	1272,4	1276,6	0,308	0,230	0,618	4,83
	Fb	1376,3	1378,4	1276,6	1278,5	0,310	0,279	0,545	36,32
	Fc	1378,4	1380,0	1278,5	1280,1	0,205	0,213	0,649	3,92
	Fd	1380,0	1381,4	1280,1	1281,3	0,276	0,219	0,640	12,14
PLQ-Int_F_G	Int_F_Ga	1381,4	1382,5	1281,3	1282,3	0,231	0,203	0,613	3,33
	Int_F_Gb	1382,5	1383,8	1282,3	1283,5	0,080	0,192	0,653	0,01
	Int_F_Gc	1383,8	1385,7	1283,5	1285,4	0,146	0,184	0,660	2,79
	Int_F_Gd	1385,7	1387,0	1285,4	1286,6	0,019	0,257	0,667	5,13

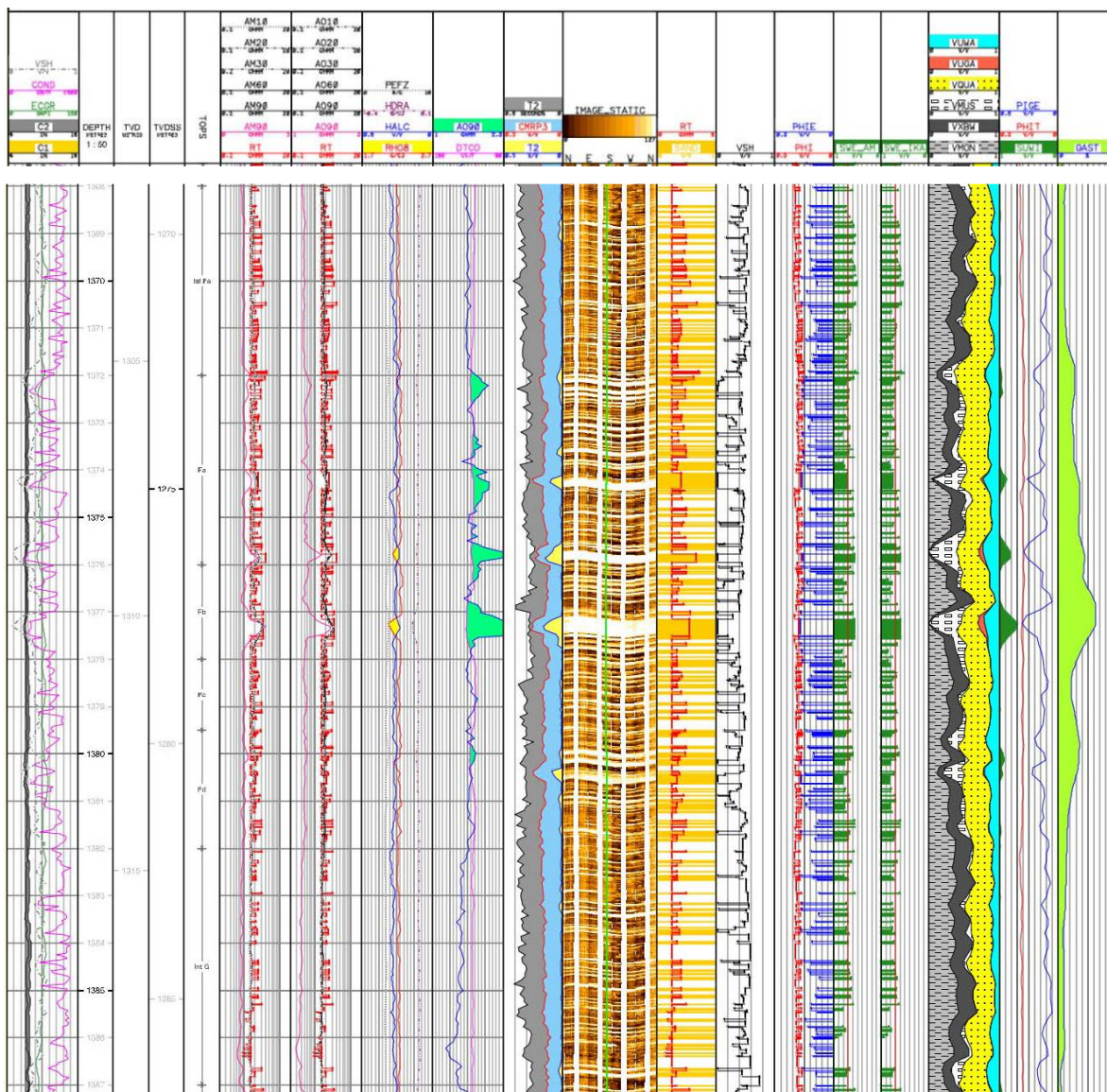
Kao rezultat provedene analize, određena je moćnost ležišta PLQ-F u vrijednosti

$$\sum_{i=1}^n (k_{NMR,i} h_i)_{NMR} = 191,96 \text{ mD} . \text{ Moćnost je ovdje računata za ukupnu debljinu propusnih tijela}$$

$$(h_{ef})_{NMR} = 3,85 \text{ m} . \text{ Srednja propusnost po Timur – Coatesu iznosi } k_{NMR} = 49,86 \text{ mD} . \text{ Budući}$$

da simulacije hidrauličkog frakturiranja pri izračunu vrijednosti bezdimenzijske provodljivosti frakture uvažavaju isključivo srednju propusnost po punoj visini cjelokupnog ležišta (od podine do krovine), za potrebe ovog istraživanja je uzeta vrijednost  $(h_{ef})_{NMR} = 8,92 \text{ m}$ , što u konačnici

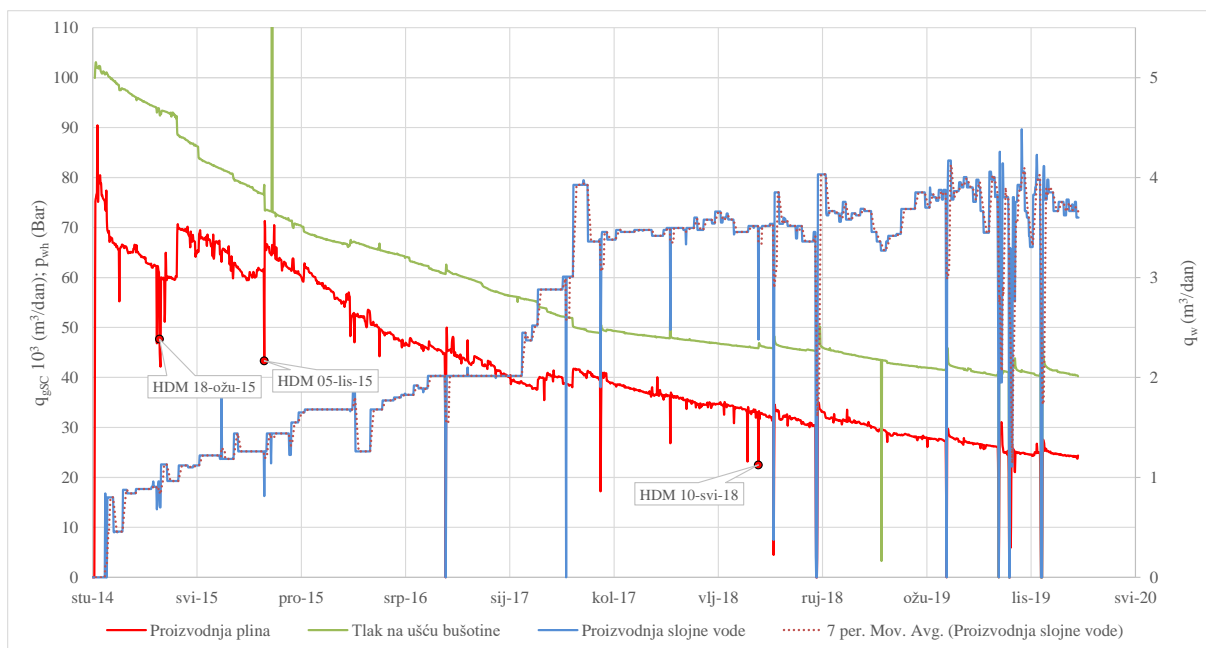
daje srednju propusnost ležišta  $k_{NMR} = 21,52 \text{ mD}$ .



Slika 33. Kompozitni dijagram rezultata petrofizikalne TLA analize (e-tlac®) šire zone ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir, preuzeto iz INA-ENI (2014).

#### 4.4.3. Proizvodna karakterizacija ležišta

Proizvodnja plina iz ležišta PLQ-F započeta je u studenome 2014. Slika 34. prikazuje historijat proizvodnje plina i slojne vode te kretanje tlaka na ušću bušotine.



Slika 34. Produktivni historijat ležišta PLQ-F u bušotini SJ - 2 Dir (INA 2020).

Prva hidrodinamska mjerenja hidraulički frakturiranog ležišta PLQ-F provedena su četiri mjeseca nakon početka proizvodnje. Na taj način omogućeno je dovoljno vremena da se ležište očisti od radnog fluida izgubljenog tijekom procesa frakturiranja. U isto vrijeme, omogućeno je da se dobiju važni podaci prije eventualnih promjena nastalih kao posljedice proizvodnje. Karakteristična vremenski uvjetovana oštećenja frakture i ležišta su promjene relativnih propusnosti, čepljenje pora ležišta i frakture zbog migracije ležišnog materijala i kompaktacija frakture zbog pada ležišnog tlaka. Ove promjene mogu se jasno vidjeti kroz rezultate kasnijih interpretacija porasta tlaka prikazanih u tablici 15. i tablici 16., gdje su, osim smanjenja efektivnih propusnosti, prisutne i nelogičnosti poput znatnih razlika u interpretiranim poluduljinama frakture. Iz tog je razloga u ovom istraživanju prvi test porasta tlaka koji je proveden u ožujku 2015. uzet kao ishodišni za kalibraciju i usporedbu proizvodnih parametara.

Interpretacije testa porasta tlaka provedene su korištenjem modela vertikalne frakture ograničene vodljivosti koji uključuje skladištenje u bušotini i *skin* efekt u homogenom lateralno neograničenom ležištu. Tablica 15. prikazuje rezultate interpretacije hidrodinamskih mjerenja ležišta PLQ-F za efektivnu debljinu ležišta 3,85 m dobivenu iz *TLA* analize. Vrijednosti tlaka su u apsolutnim iznosima, a vrijednost dinamičkog tlaka u bušotini odnosi se na dubinu mjernog instrumenta.

Tablica 15. Rezultati interpretacije hidrodinamskih mjerenja za efektivnu debljinu ležišta PLQ-F od 3,85 m u bušotini SJ - 2 Dir (INAgip 2015-2020).

HDM Godina	p <sub>R</sub> (bar a)	p <sub>wf</sub> (bar a)	k <sub>g</sub> h <sub>ef</sub> (mD m)	k <sub>g</sub> (mD)	x <sub>f</sub> (m)	k <sub>f</sub> w (mD m)	s <sub>t</sub>	C <sub>fD</sub>	h <sub>ef</sub> (m)
2015	123,98	108,79	63,46	16,48	17,29	5708	-4,00	20,03	<b>3,85</b>
2015	110,99	91,55	46,53	12,08	213,10	2063	-4,75	0,80	
2018	115,56	63,42	8,06	2,09	162,67	10680	-6,10	31,35	

Tablica 16. Rezultati interpretacije hidrodinamskih mjerenja za efektivnu debljinu ležišta PLQ-F od 8,92 m u bušotini SJ - 2 Dir (INAgip 2015-2020).

HDM Godina	p <sub>R</sub> (Bar a)	p <sub>wf</sub> (Bar a)	k <sub>g</sub> h <sub>ef</sub> (mD m)	k <sub>g</sub> (mD)	x <sub>f</sub> (m)	k <sub>f</sub> w (mD m)	s <sub>t</sub>	C <sub>fD</sub>	h <sub>ef</sub> (m)
2015	123,98	108,79	63,46	7,11	17,29	5708	-4,00	46,41	<b>8,92</b>
2015	110,99	91,55	46,53	5,22	213,10	2063	-4,75	1,86	
2018	115,56	63,42	8,06	0,90	162,67	10680	-6,10	72,62	

Na temelju rezultata hidrodinamskih mjerenja izrađen je proizvodni model na način kako je opisano u poglavlju 3.1.11. Ukupni *skin* efekt dobiven interpretacijom hidrodinamskih mjerenja u sebi uključuje sve komponente karakteristične za ležište opremljeno tehnikom *FP*. Tablica 17. prikazuje ulazne podatke proizvodnog modela. Proizvodni model usklađen je s korekcijama vrijednosti ukupnog *skina* do preklapanja vrijednosti izračunatog i mjenog dinamičkog tlaka u bušotini (engl. *Pressure Match*). Budući da nije rađen test „protok za protokom“ veličina ukupnog efekta turbulencije je pretpostavljena te je uzeta iz *UFD* postupka u iznosu od  $9,98853E-07$  (m<sup>3</sup>/dan)<sup>-1</sup>. Potpuno usklađenje modela dobiveno je kod vrijednosti ukupnog *skina* -2,08 preklapanjem izmjenog dinamičkog tlaka svedenog na razinu perforacija od 112,09 bar i ekvivalentne izmjerene količine plina od 60 670 m<sup>3</sup>/dan. Pri tome je vrijednost linearnog *skina* -2,14, a ekvivalentni *skin* kao posljedica turbulencije iznosi 0,06.

Tablica 17. Ulazni podaci za proračun indeksa proizvodnosti temeljem *HDM* iz ožujka 2015. ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

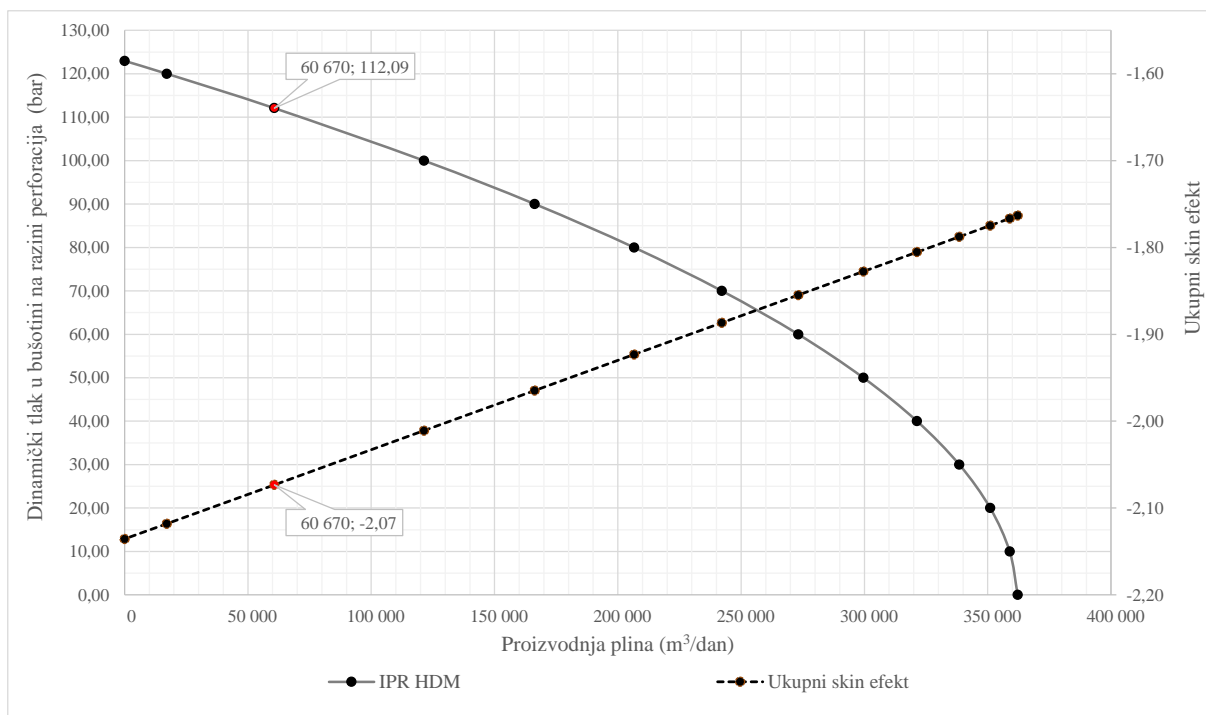
<b>pVT</b>			
Srednji ležišni tlak	$p_R$	bar	122,97
Ležišna temperatura	$t_R$	°C	40,40
Relativna gustoća plina	$\gamma_g$		0,5578
Odnos kondenzata i plina	CGR	$m^3/m^3$	0,00
Gustoća kondenzata	$\rho_c$	$kg/m^3$	750,00
Odnos vode i plina	WGR	$m^3/m^3$	0,015
Relativna gustoća vode	$\gamma_w$		1,01
Molni udio H <sub>2</sub> S		%	0,00
Molni udio CO <sub>2</sub>		%	0,02
Molni udio N <sub>2</sub>		%	0,67
Korelacija za viskozitet (0 - Lee at al.; 1 - Carr at al.)		Lee at al.	0
<b>Ležište PLQ-F (HDM iz ožujka 2015. )</b>			
Moćnost ležišta u FP intervalu (1303,05 mTVD - 1315,65 mTVD)	$(k_g h_{ef})_{FP}$	mD m	63,46
Efektivna propusnost za plin FP intervala	$k_{g,FP}$	mD	16,48
Efektivna debljina ležišta FP intervala iz TLA analize	$(h_{ef})_{FP}$	m	3,85
Drenažni radius bušotine	$r_e$	m	300
Polumjer bušotine	$r_w$	m	0,10795
Visina perforacija (mjerene duljine)	$h_p$	m	7,00
Perforirani interval (1373,0 mMD - 1380,0 mMD)		mTVD	1306,1-1312,6

Tablica 18. daje detaljan prikaz rezultata proračuna modela: proizvodnih pokazatelja i indeksa proizvodnosti. Temeljem izračunatih vrijednosti generirana je odgovarajuća indikatorska krivulja.

Tablica 18. Rezultati proračuna proizvodnog modela frakturiranog tanko proslojenog ležišta PLQ-F u bušotini SJ – 2 Dir temeljenog na hidrodinamskim mjerenjima iz ožujka 2015.

$p_{wf}$	$\bar{\mu}_g$	$\bar{Z}$	$s_{FP,HDM}$	$D_{FP,HDM}$	$s_{FP,HDM,i}$	$a_{FP,HDM}$	$b_{FP,HDM}$	$q_{gSC,HDM}$
(Bar)	(mPa s)			$(m^3/dan)^{-1}$		$(Pa^2 (m^3/s)^{-1})$	$(Pa^2 (m^3/s)^{-2})$	$(m^3/dan)$
0,00	0,013107	0,908586	-2,14	9,98853E-07	-1,77	3,36619E+13	5,759139E+11	362 139
10,00	0,013237	0,902322	-2,14	9,98853E-07	-1,78	3,37617E+13	5,776222E+11	358 895
20,00	0,013374	0,896289	-2,14	9,98853E-07	-1,79	3,38814E+13	5,796696E+11	350 997
30,00	0,013516	0,890503	-2,14	9,98853E-07	-1,80	3,40213E+13	5,820635E+11	338 466
40,00	0,013665	0,884977	-2,14	9,98853E-07	-1,81	3,4182E+13	5,848120E+11	321 316
50,00	0,013819	0,879727	-2,14	9,98853E-07	-1,84	3,43638E+13	5,879223E+11	299 555
60,00	0,013980	0,874766	-2,14	9,98853E-07	-1,86	3,45672E+13	5,914025E+11	273 184
70,00	0,014146	0,870107	-2,14	9,98853E-07	-1,89	3,47926E+13	5,952594E+11	242 198
80,00	0,014319	0,865761	-2,14	9,98853E-07	-1,93	3,50405E+13	5,994993E+11	206 582
90,00	0,014497	0,861739	-2,14	9,98853E-07	-1,97	3,5311E+13	6,041279E+11	166 312
100,00	0,014680	0,858051	-2,14	9,98853E-07	-2,01	3,56045E+13	6,091497E+11	121 350
112,09	0,014907	0,854077	-2,14	9,98853E-07	-2,08	3,59874E+13	6,156995E+11	60 670
120,00	0,015062	0,851705	-2,14	9,98853E-07	-2,12	3,62612E+13	6,203850E+11	17 119
122,97	0,015101	0,851147	-2,14	9,98853E-07	-2,14	3,6332E+13	6,215963E+11	0

Slika 35. daje prikaz indikatorske krivulje i kretanja ukupnog *skin* efekta.



Slika 35. Indikatorska krivulja i ukupni *skin* efekt frakturiranog tanko proslojenog ležišta PLQ-F u bušotini SJ – 2 Dir temeljeni na hidrodinamskim mjerenjima iz ožujka 2015.

Budući da hidrodinamskim mjerenjima utvrđena moćnost ležišta PLQ-F iznosi  $(k_g h_{ef})_{HDM} = 63,46 \text{ mDm}$ , a da je moćnost ležišta procijenjenih iz *NMR* karotažnih mjerenja i *TLA* analize jednaka  $\sum_{i=1}^n (k_{NMR,i} h_i) = 191,96 \text{ mDm}$ , koeficijent korekcije propusnosti  $\xi_{NMR}$  tada je sukladno obrascu (2.2) jednak:

$$\xi_{NMR} = \frac{(k_g h_{ef})_{HDM}}{\sum_{i=1}^n (k_{NMR,i} h_i)_{NMR}} = \frac{63,46 \text{ mDm}}{191,96 \text{ mDm}} = 0,330588.$$

Srednja efektivna propusnost za plin, ako se u proračun uzme efektivna debljina 8,92 m, u tom slučaju iznosi:

$$k_g = \frac{\xi_{NMR} \sum_{i=1}^n (k_{NMR,i} h_i)_{NMR}}{h_{ef}} = 0,330588 \frac{191,96 \text{ mDm}}{8,92 \text{ m}} = 7,11 \text{ mD}.$$

Tablica 61. (prilog 4.) daje detaljan tablični prikaz zonacije ležišta i distribucije propusnosti u bušotini SJ – 2 Dir kao rezultat *TLA* analize i provedene korekcije distribucije efektivnih propusnosti za plin.

#### 4.4.4. Geomehantička i filtracijska karakterizacija ležišta

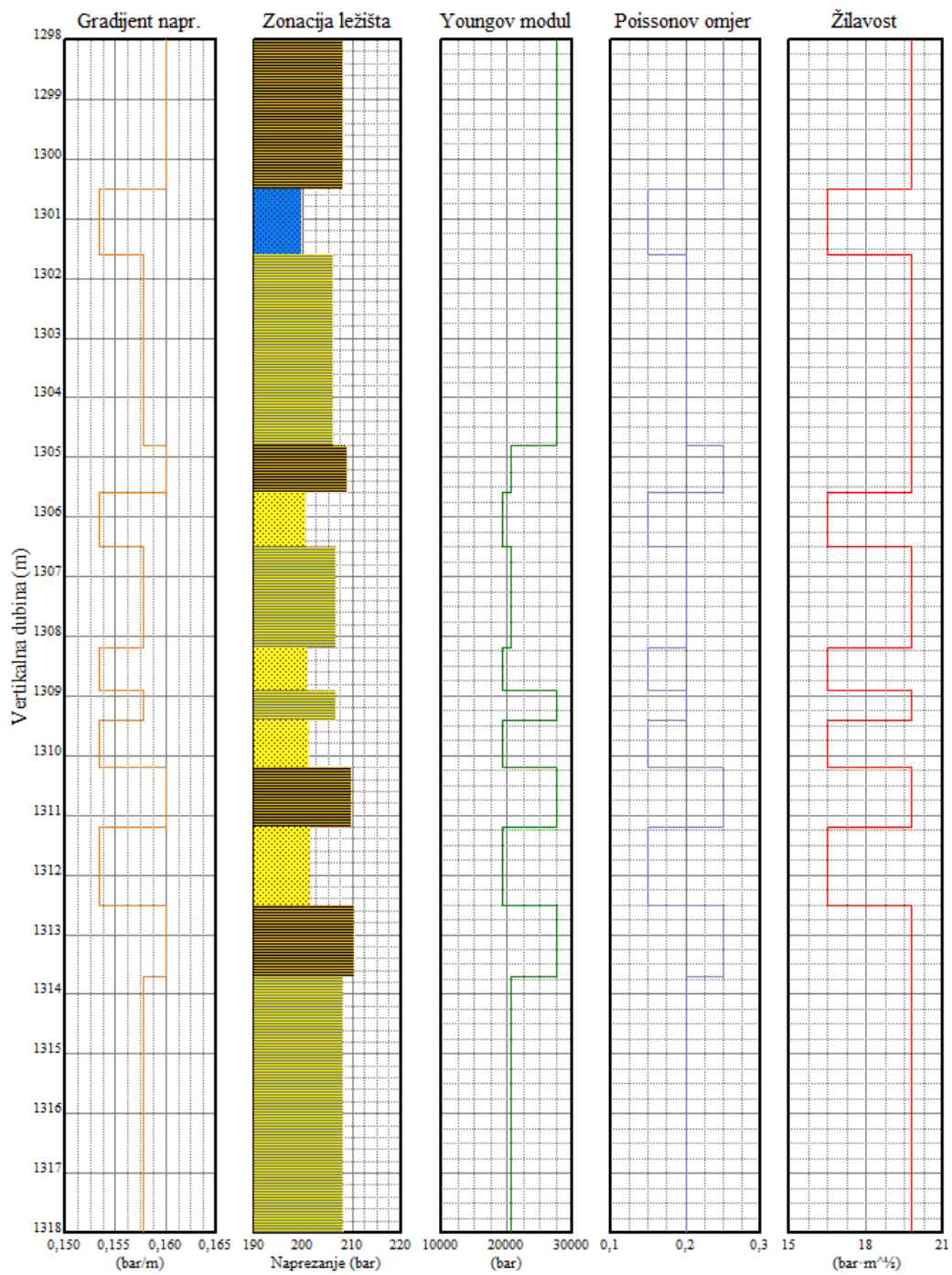
Za početnu geomehantičku i filtracijsku karakterizaciju iskorišteno je hidrauličko frakturiranje u području ležišta PLQ-F izvedeno u siječnju 2014. godine. Program hidrauličkog frakturiranja temeljio se na „brzoj petrofizikalnoj interpretaciji“ i zonaciji ležišta. Sam proces uključivao je sva tri karakteristična koraka. Kod preliminarnog dizajna geomehantička i filtracijska svojstva pojedinih zona su definirana temeljem iskustva na sličnim ležištima. Nakon kalibracijskih testova: testa uz više obroka utiskivanja (engl. *Step Rate Test*) i testa mini-hidrauličkog frakturiranja (engl. *Mini-Frac Test*) izvršena je kalibracija geomehantičkih i filtracijskih svojstva pojedinih zona, tzv. redizajn. Osnovom kalibriranih vrijednosti izrađen je program izvođenja hidrauličkog frakturiranja ležišta PLQ-F kako je prikazano u tablici 19.

Tablica 19. Originalni program izvođenja hidrauličkog frakturiranja za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

Redni broj ili naziv koraka	Protok kaše na razini perforacija	Volumen radnog fluida	Volumen kaše	Ukupni volumen kaše	Ukupno vrijeme	Radni fluid	Podupirač	Koncentracija podupirača od:	Koncentracija podupirača do:	Masa podupirača u koraku
	(m <sup>3</sup> /min)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(min)			(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	
1	1,256	7,66	7,66	7,66	6,19	24 mPas	0	0	0	0
2	1,272	3,14	3,31	10,97	8,79	24 mPas	30/50	99,823	188,38	452
3	1,272	2,92	3,18	14,15	11,29	24 mPas	30/50	195,7	284,25	701
4	1,272	2,94	3,31	17,46	13,89	24 mPas	30/50	291,54	380,1	988
5	1,272	2,96	3,43	20,89	16,59	24 mPas	30/50	387,9	487,5	1293
6	1,272	2,97	3,56	24,45	19,39	24 mPas	30/50	495,22	583,79	1601
7	1,272	2,27	2,80	27,25	21,59	24 mPas	30/50	590,64	668,18	1428
8	1,272	1,32	1,65	28,90	22,89	24 mPas	30/50	672,08	694,25	901
9	1,272	1,41	1,78	30,69	24,29	24 mPas	30/50	696,04	718,21	998
10	1,272	0,99	1,27	31,96	25,29	24 mPas	30/50	722,9	800,28	756
11	1,272	1,07	1,40	33,36	26,39	24 mPas	30/50	804,5	837,66	881
12	1,272	0,78	1,02	34,37	27,19	24 mPas	30/50	838,79	838,79	651
13	1,266	1,16	1,53	35,90	28,40	24 mPas	30/50	838,79	838,79	977
14	0,145	0,05	0,06	35,96	28,82	24 mPas	30/50	838,79	838,79	39
	Ukupno:	31,64	35,96					Ukupno:	11667	

Za potrebe ovog istraživanja, na osnovu originalnog programa i zonacije, geomehantičkih i filtracijska svojstva pojedinih zona inicijalnog modela, izrađen je 3D model u numeričkom simulatoru hidrauličkog frakturiranja *MFrac* firme Baker Hughes. Isti je usklađen s korekcijama vrijednosti geomehantičkih i filtracijska svojstva do preklapanja krivulja izračunatog i mjenog efektivnog tlaka u bušotini (engl. *Net Pressure Match*). Vizualni prikaz originalne zonacije i korigiranih geomehantičkih mehanička svojstva pojedinih zona dan je na slici 36.





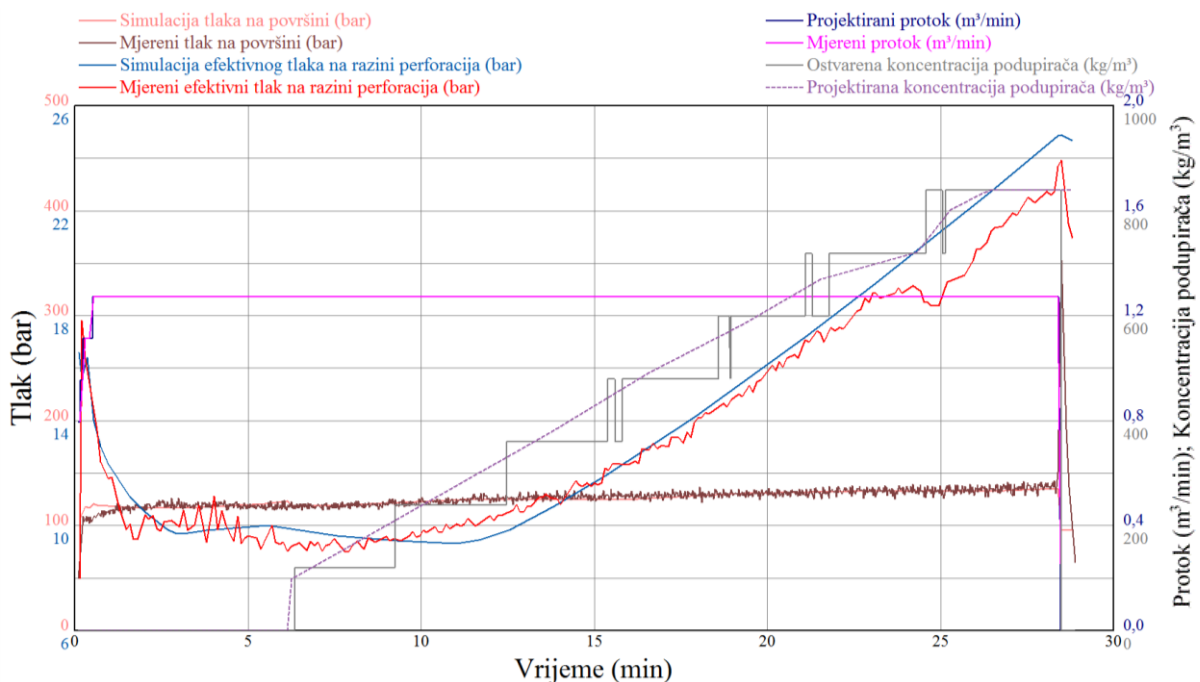
Slika 36. Mehanička svojstva ležišta temeljena na originalnoj zonaciji i simulaciji ponašanja efektivnog tlaka tijekom frakturiranja u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

Tablica 20. daje pregled konačnih korigiranih geomehaničkih svojstva i ukupnih koeficijenta filtracije.

Tablica 20. Mehanička svojstva i ukupni koeficijenti filtracije temeljeni na originalnoj zonaciji i simulaciji ponašanja efektivnog tlaka tijekom frakturiranja u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

Litologija	Vertikalna dubina (podina)	Mjerena dubina (podina)	Gradijent napreznja	Napreznje	Youngov modul elastičnosti	Poissonov omjer	Žilavost	Efektivni koeficijent filtracije
	m	m	bar/m	bar	bar		bar·m <sup>1/2</sup>	m/min <sup>1/2</sup>
	1294,00	1359,50	0,158	204,25	27579	0,20	19,779	0,000305
	1300,50	1366,50	0,160	208,17	27579	0,25	19,779	0,000030
	1301,60	1367,70	0,153	199,65	27579	0,15	16,483	0,001625
	1304,80	1371,20	0,158	205,96	27579	0,20	19,779	0,000305
	1305,60	1372,00	0,160	208,99	20684	0,25	19,779	0,000030
	1306,50	1373,00	0,153	200,4	19305	0,15	16,483	0,001625
	1308,20	1374,80	0,158	206,49	20684	0,20	19,779	0,000305
	1308,90	1375,60	0,153	200,77	19305	0,15	16,483	0,001625
	1309,40	1376,10	0,158	206,68	27579	0,20	19,779	0,000305
	1310,20	1377,00	0,153	200,97	19305	0,15	16,483	0,001625
	1311,20	1378,10	0,160	209,89	27579	0,25	19,779	0,000030
	1312,50	1379,50	0,153	201,32	19305	0,15	16,483	0,001625
	1313,70	1380,80	0,160	210,29	27579	0,25	19,779	0,000030
	1318,10	1385,50	0,158	208,05	20684	0,20	19,779	0,000305
	1320,00	1387,60	0,153	202,47	19305	0,15	16,483	0,001625
	1321,00	1388,60	0,160	211,46	27579	0,25	19,779	0,000030

Usporedni grafički prikaz mjerenih vrijednosti ponašanja tlakova tijekom izvođenja hidrauličkog frakturiranja, protoka i koncentracije podupirača te ekvivalentnih simuliranih vrijednosti tlaka ušća bušotine i efektivnog tlaka u bušotini prikazan je na slici 37.



Slika 37. Dijagram simulacije frakturiranja području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir temeljenoj na originalnoj zonaciji.

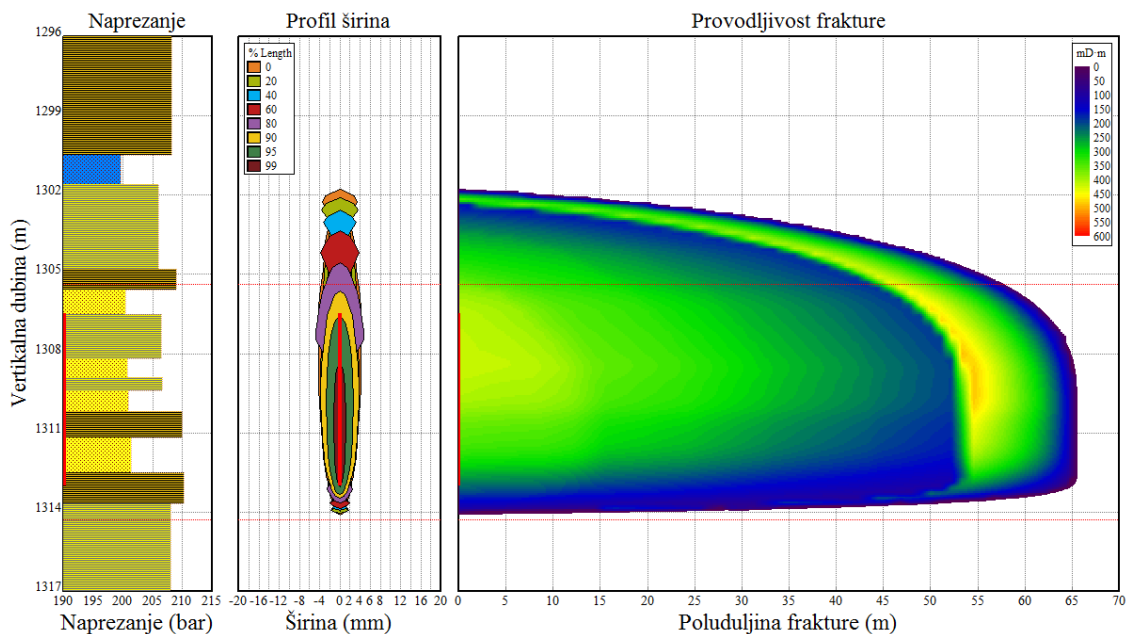
Rezultati simulacije glavnih parametara frakture, njena geometrija i proizvodne karakteristike prikazane su u tablici 21.

Tablica 21. Rezultati simulacije glavnih parametara frakture za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir temeljenoj na originalnoj zonaciji.

**Parametri frakture**

Efikasnost radnog fluida		46,9%
Efektivni tlak na razini perforacija	(bar)	24,88
Hidraulička (kreirana) poluduljina frakture	(m)	65,63
Gornja ekstenzija od centra inicijacije frakture u bušotini	(m)	10,08
Doljna ekstenzija od centra inicijacije frakture u bušotini	(m)	2,27
Vertikalna dubina vrha frakture u bušotini	(m)	1301,80
Vertikalna dubina dna frakture u bušotini	(m)	1314,10
Ukupna visina frakture u bušotini	(m)	12,35
Maksimalna hidraulička širina frakture u bušotini	(mm)	16,86
Srednja hidraulička širina frakture u bušotini	(mm)	12,29
Poluduljina frakture ispunjena podupiračem	(m)	65,20
Srednja visina frakture ispunjena podupiračem	(m)	10,44
Srednja visina frakture u ležištu PLQ - F ispunjena podupiračem	(m)	8,36
Srednja širina frakture ispunjena podupiračem	(mm)	7,00
Srednja širina frakture u ležištu PLQ - F ispunjena podupiračem	(mm)	5,38
Srednja koncentracija podupirača u frakturi	(kg/m <sup>2</sup> )	8,50
Srednja koncentracija podupirača u ležištu PLQ - F	(kg/m <sup>2</sup> )	8,92
Provodljivost frakture u ležištu PLQ - F	(mD·m)	269,78
Bezdimenzijska provodljivost frakture u ležištu PLQ - F		0,582
Srednja propusnost frakture za plin	(mD)	50125
Vrijeme zaustavljanja rasta frakture (engl. <i>Tip Screen Out Time</i> )	(min)	10,98

Vizualni prikaz simulirane geometrije i provodljivosti frakture prikazan je na slici 38.



Slika 38. Simulirana geometrija i provodljivost frakture u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir temeljena na originalnoj zonaciji.

Nakon što je simulacijom potvrđen model hidrauličkog frakturiranja temeljen na originalnoj zonaciji, idući korak je izrada modela koji se zasniva na raspoloživoj *TLA* analizi i simulaciji ponašanja efektivnog tlaka iz siječnja 2014. Za inicijalne vrijednosti mehaničkih svojstava i ukupnih koeficijenta filtracije uzete su korigirane vrijednosti iz originalne zonacije. Korekcija distribucije efektivnog koeficijenta filtracije provedena je prema proceduri prikazanoj u poglavlju 4.2. Tablica 22. daje prikaz izračunatih korelativnih koeficijenta (koeficijent pravca i odsječak na osi y) distribucije, efektivnog koeficijenta filtracije radnog fluida u odnosu na propusnost pojedinih litologija.

Tablica 22. Korelativni koeficijenti distribucije ukupnog koeficijenta filtracije radnog fluida u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

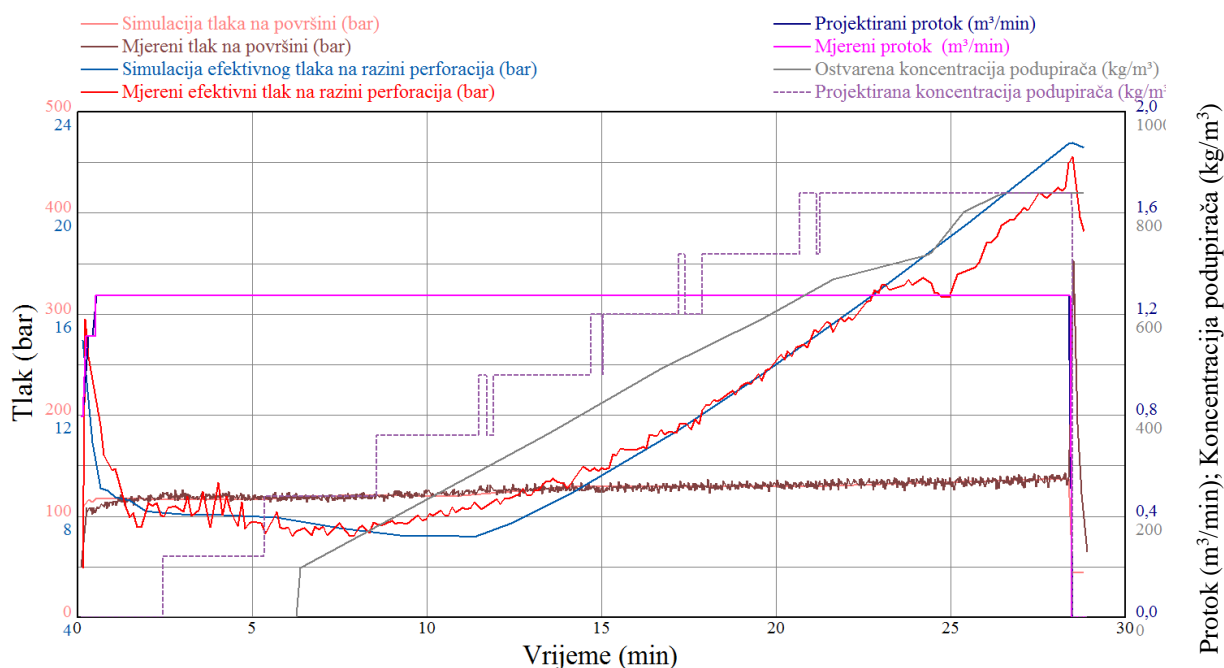
Litologija		Efektivna propusnost za plin		Efektivni koeficijent filtracije			
		Donja granica	Gornja granica	Donja granica	Gornja granica	Koeficij. pravca	Odsječak na osi y
NAZIV	SIMBOL	mD	mD	m/min <sup>1/2</sup>	m/min <sup>1/2</sup>	(m/min <sup>1/2</sup> )/mD	m/min <sup>1/2</sup>
ŠEJL		0	0	0,00000	0,00003	0,00000	
SILT		> 0	<= 1	0,00003	0,00030	0,00027	0,00003
PRLJAVI PIJESAK		> 1	<= 5	0,00030	0,00152	0,00030	0,00000
PIJESAK		> 5	<= 50	0,00152	0,00305	0,00003	0,00135
NEKONSOLIDIRANI PIJESAK		> 50	<= 500	0,00305	0,03048	0,00006	0,00000

Program hidrauličkog frakturiranja istovjetan je originalnom i prikazan je u tablici 23.

Tablica 23. Originalni program izvođenja hidrauličkog frakturiranja za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir temeljen na *TLA* analizi.

Redni broj ili naziv koraka	Protok radnog fluida na površini	Protok kaše na razini perforacija	Volumen radnog fluida	Volumen kaše	Ukupni volumen kaše	Ukupno vrijeme	Radni fluid	Podupirač	Koncentracija podupirača od:	Koncentracija podupirača do:	Masa podupirača u koraku
	(m <sup>3</sup> /min)	(m <sup>3</sup> /min)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(min)			(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	
Bušotina	1,232	4,839	4,84	4,84	4,84	3,97	24 mPas	0	0	0	0
1	1,272	2,960	2,96	2,96	7,80	6,30	24 mPas	0	0	0,65264	1
2	1,272	3,307	3,14	3,31	11,11	8,90	24 mPas	30/50	99,824	188,37	452
3	1,272	3,180	2,92	3,18	14,29	11,40	24 mPas	30/50	195,68	284,26	701
4	1,272	3,307	2,94	3,31	17,59	14,00	24 mPas	30/50	291,54	380,1	988
5	1,272	3,434	2,96	3,43	21,03	16,70	24 mPas	30/50	387,89	487,5	1293
6	1,272	3,561	2,97	3,56	24,59	19,50	24 mPas	30/50	495,22	583,79	1601
7	1,272	2,798	2,27	2,80	27,39	21,70	24 mPas	30/50	590,65	668,17	1428
8	1,272	1,654	1,32	1,65	29,04	23,00	24 mPas	30/50	672,08	694,25	901
9	1,272	1,781	1,41	1,78	30,82	24,40	24 mPas	30/50	696,04	718,21	998
10	1,272	1,272	0,99	1,27	32,09	25,40	24 mPas	30/50	722,96	800,23	756
11	1,272	1,399	1,07	1,40	33,49	26,50	24 mPas	30/50	804,47	837,69	881
12	1,272	1,018	0,78	1,02	34,51	27,30	24 mPas	30/50	838,79	838,79	651
13	1,155	1,452	1,11	1,45	35,96	28,82	24 mPas	30/50	838,79	838,79	929
	Ukupno:		31,67	35,96					Ukupno:		11581

3D simulacijski model hidrauličkog frakturiranja je usklađen korekcijama vrijednosti geomehaničkih i filtracijska svojstva do preklapanja vrijednosti mjerenog efektivnog tlaka u bušotini na razini perforacija. Usporedni grafički prikaz mjerenih vrijednosti ponašanja tlakova tijekom izvođenja hidrauličkog frakturiranja, protoka i koncentracije podupirača te ekvivalentnih simuliranih vrijednosti tlaka na ušću bušotine i efektivnog tlaka u bušotini na razini perforacija prikazani su na slici 39.



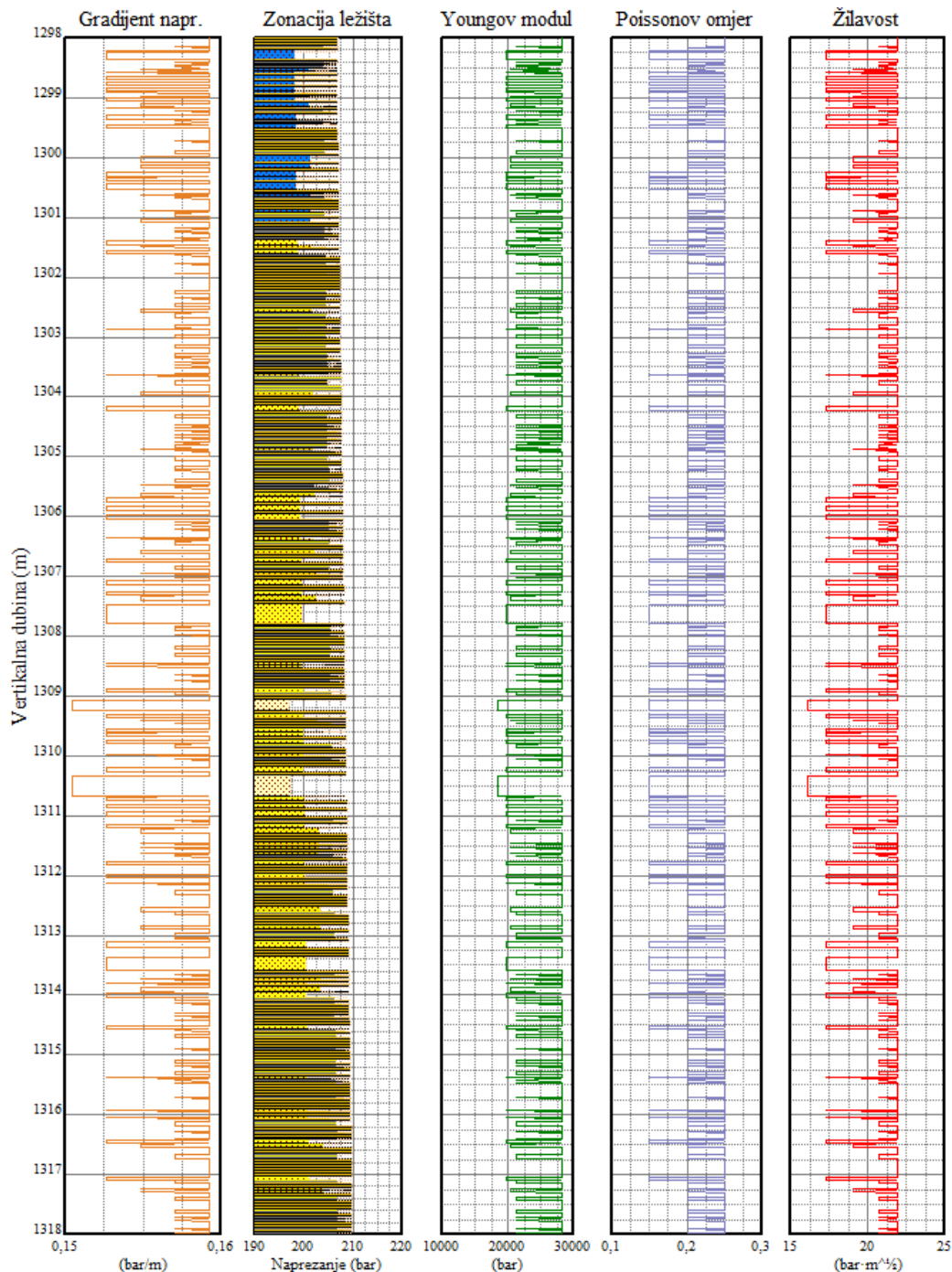
Slika 39. Dijagram simulacije frakturiranja u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 temeljenoj na TLA analizi.

Tablica 24. Mehanička svojstva i srednji efektivni koeficijenti filtracije temeljeni na TLA analizi i simulaciji ponašanja efektivnog tlaka tijekom frakturiranja u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

Litologija		Gradijent naprezanja	Youngov modul elastičnosti	Poissonov omjer	Žilavost	Srednji efektivni koeficijent filtracije
NAZIV	SIMBOL	bar/m	bar		bar·m <sup>1/2</sup>	m/min <sup>1/2</sup>
ŠEJL		0,1593	28269	0,25	21,922	0,00006
SILT		0,1571	21201	0,20	20,768	0,00016
PRLJAVI PIJESAK		0,1549	20498	0,20	19,043	0,00164
PIJESAK		0,1526	19788	0,15	17,307	0,00369
NEKONSOLIDIRANI PIJESAK		0,1504	18375	0,15	16,153	0,00808
Srednja vrijednost pijesaka:						0,00338

Sažeti pregled korigiranih geomehaničkih svojstva, propusnosti i srednjih efektivnih koeficijenta filtracije prikazan je u tablici 24.

Tablica 62. iz priloga 5. prikazuje početne i završne vrijednosti pojedinih geomehaničkih svojstava i pripadajuće faktore korekcije. Vrijednosti korekcije propusnosti po pojedinim litologijama te odnosnih raspona i faktora korekcije efektivnih koeficijenta filtracije nalaze se u tablici 63. Detaljna zonacija s pripadajućim korigiranim parametrima može se naći u prilogu 5. u tablici 64. Odnosni grafički prikaz geomehaničkih svojstva prikazan je na slici 40.



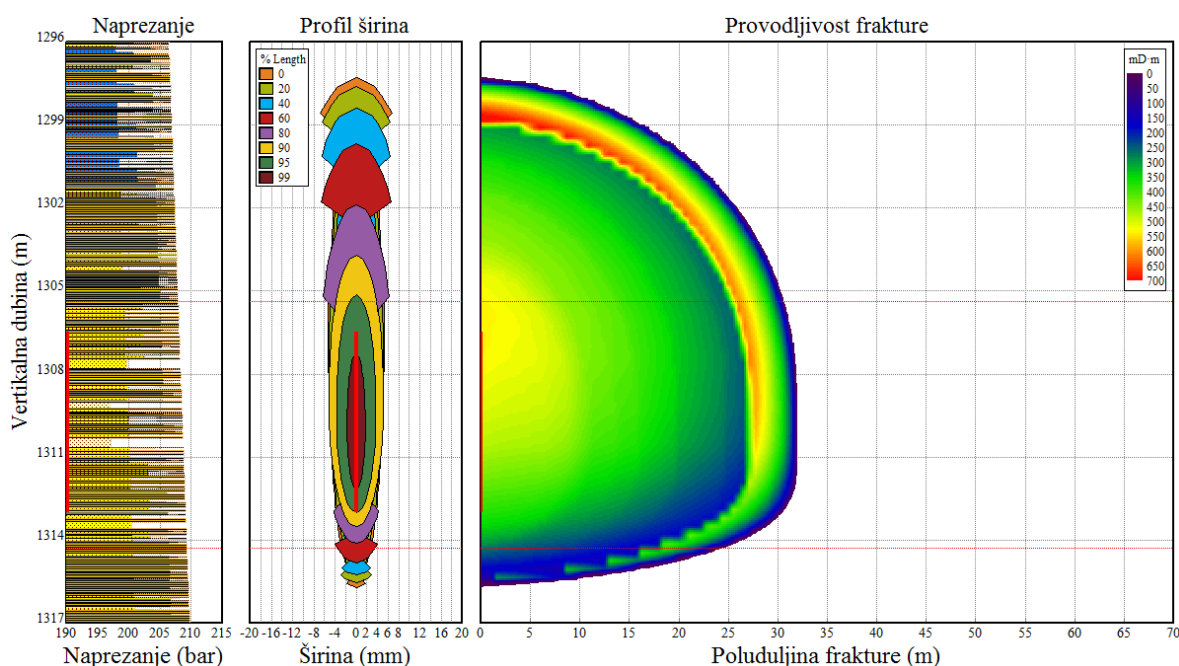
Slika 40. Mehanička svojstva ležišta temeljena na TLA analizi i simulaciji ponašanja tlaka tijekom frakturiranja u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.



Komparativni prikaz rezultata simulacije glavnih parametara frakture temeljene na originalnoj i TLA zonaciji dan je u tablici 25.

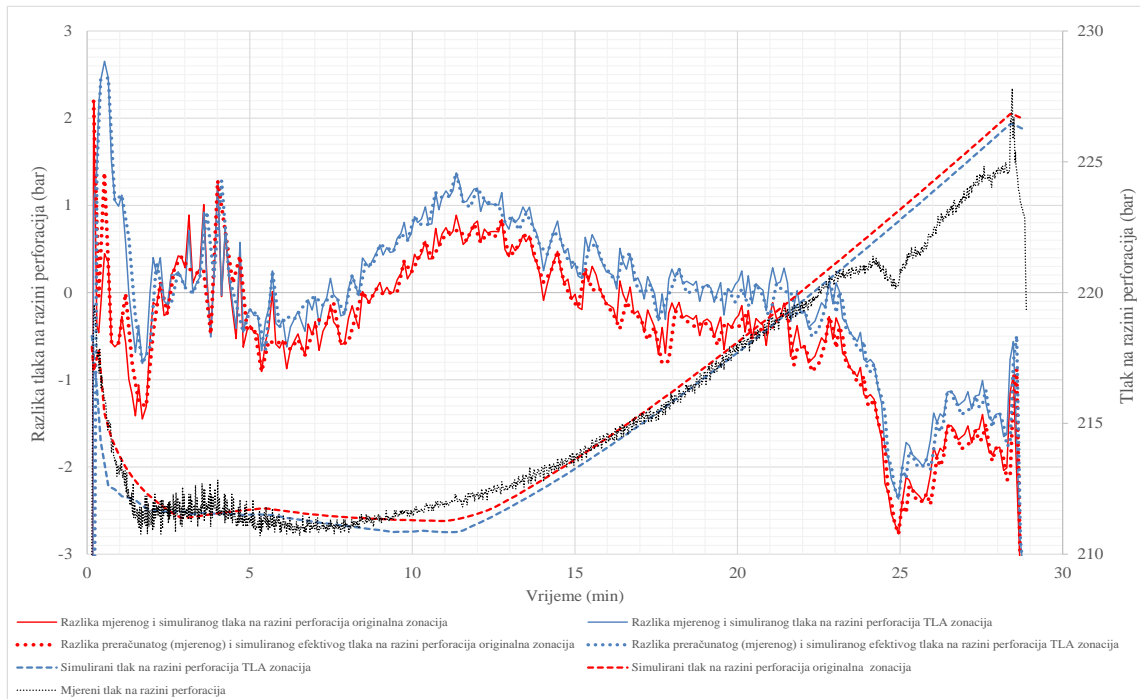
Tablica 25. Komparativni prikaz rezultata simulacije glavnih parametara frakture za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir temeljene na originalnoj i TLA zonaciji.

Parametri frakture		Original	TLA	Razlika
Efikasnost radnog fluida		46,9%	44,1%	-2,8%
Efektivni tlak na razini perforacija	(bar)	24,88	22,79	-2,09
Hidraulička (kreirana) poluduljina frakture	(m)	65,63	32,03	-33,60
Gornja ekstenzija od centra inicijacije frakture u bušotini	(m)	10,08	12,93	2,85
Doljna ekstenzija od centra inicijacije frakture u bušotini	(m)	2,27	5,49	3,23
Vertikalna dubina vrha frakture u bušotini	(m)	1301,80	1297,30	-4,50
Vertikalna dubina dna frakture u bušotini	(m)	1314,10	1315,70	1,60
Ukupna visina frakture u bušotini	(m)	12,35	18,42	6,08
Maksimalna hidraulička širina frakture u bušotini	(mm)	16,86	25,24	8,38
Srednja hidraulička širina frakture u bušotini	(mm)	12,29	16,52	4,23
Poluduljina frakture ispunjena podupiračem	(m)	65,20	31,99	-33,21
Srednja visina frakture ispunjena podupiračem	(m)	10,44	14,98	4,54
Srednja visina frakture u ležištu PLQ - F ispunjena podupiračem	(m)	8,36	8,75	0,39
Srednja širina frakture ispunjena podupiračem	(mm)	7,00	9,24	2,24
Srednja širina frakture u ležištu PLQ - F ispunjena podupiračem	(mm)	5,38	7,55	2,17
Srednja koncentracija podupirača u frakturi	(kg/m <sup>2</sup> )	8,50	12,07	3,56
Srednja koncentracija podupirača u ležištu PLQ - F	(kg/m <sup>2</sup> )	8,92	12,53	3,61
Provodljivost frakture u ležištu PLQ - F	(mD·m)	269,78	378,57	108,79
Bezdimenzijska provodljivost frakture u ležištu PLQ - F		0,582	0,718	0,136
Srednja propusnost frakture za plin	(mD)	50125	50125	0
Vrijeme zaustavljanja rasta frakture (engl. <i>Tip Screen Out Time</i> )	(min)	10,98	10,12	-0,86

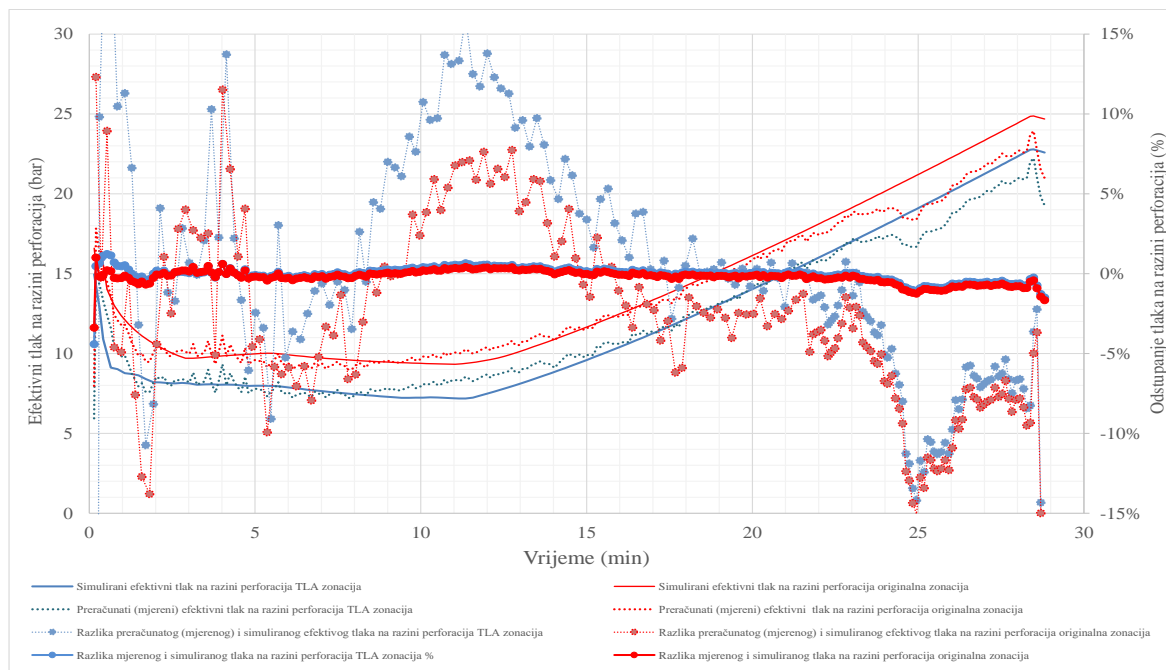


Slika 41. Simulirana geometrija i provodljivost frakture u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir temeljena na TLA analizi.

Vizualni prikaz simulirane geometrije i provodljivosti frakture dan je na slici 38., dok je grafički prikaz razlika mjerenih i simuliranih tlakova u bušotini i efektivnih tlakova na razini perforacija za svaku zonaciju pojedinačno prikazan na slici 42. i slici 43.



Slika 42. Dijagram razlike mjerenog i simuliranog tlaka te razlike efektivnog tlaka na razini perforacija u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.



Slika 43. Dijagram postotne razlike mjerenog i simuliranog tlaka te postotne razlike efektivnog tlaka na razini perforacija u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.



Tablica 26. sublimira vrijednosti razlike mjerenih i simuliranih tlakova u bušotini i efektivnih tlakova na razini perforacija za oba slučaja.

Tablica 26. Razlika mjerenih i simuliranih tlakova u bušotini i efektivnih tlakova na razini perforacija kod originalne i TLA zonacije u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

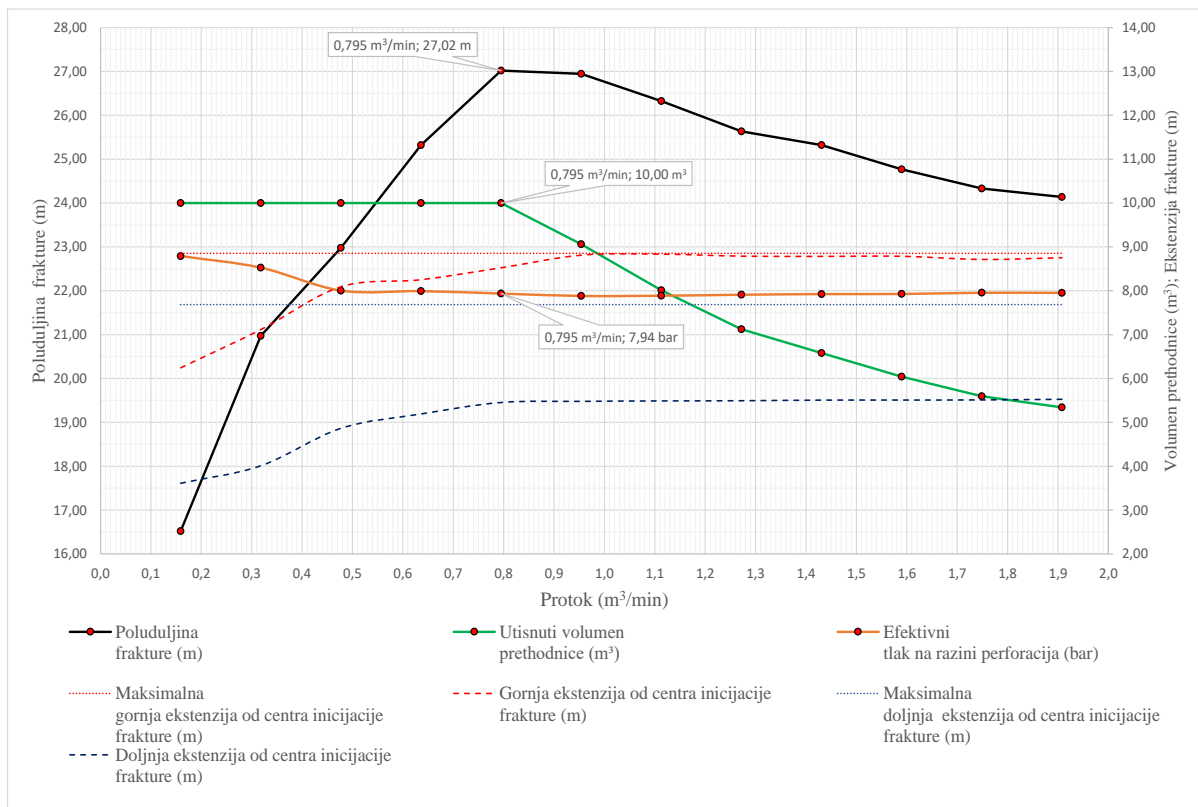
Minuta	Razlika mjenog i simuliranog tlaka na razini perforacija originalna zonacija (bar)	Razlika mjenog i simuliranog tlaka na razini perforacija originalna zonacija (%)	Razlika mjenog i simuliranog tlaka na razini perforacija TLA zonacija (bar)	Razlika mjenog i simuliranog tlaka na razini perforacija TLA zonacija (%)	Razlika pre računatog (mjenog) i simuliranog efektivog tlaka na razini perforacija originalna zonacija (bar)	Razlika pre računatog (mjenog) i simuliranog efektivog tlaka na razini perforacija originalna zonacija (%)	Razlika pre računatog (mjenog) i simuliranog efektivog tlaka na razini perforacija TLA zonacija (bar)	Razlika pre računatog (mjenog) i simuliranog efektivog tlaka na razini perforacija TLA zonacija (%)
0. - 28.	-0,45	-0,20%	-0,06	-0,02%	-0,71	-4,00%	-0,32	-1,34%
3. - 23.	-0,05	-0,02%	0,28	0,13%	-0,12	-0,63%	0,24	2,80%

#### 4.4.5. Izrada dijagrama ravnotežnih odnosa geometrije frakture

Slika 66. iz priloga 6. prikazuje dijagram ravnotežnih visina i poluduljina frakture u funkciji veličine protoka prethodnice. Dijagram ravnotežnih odnosa rezultat je simulacija provedenih u 3D modelu koji se zasniva na TLA zonaciji. Simulacije su provedene za volumen prethodnice od 10 m<sup>3</sup> i u rasponu protoka od 0,159 m<sup>3</sup>/min (1 bbl/min) pa do maksimalno ostvarivih 1,908 m<sup>3</sup>/min (12 bbl/min). Volumen prethodnice u iznosu od 10 m<sup>3</sup> uzet je kao maksimalan zbog raspoloživih kapaciteta rezervoarskog prostora. Granične vrijednosti rasta frakture postavljene su u krovinskom dijelu na 1302,8 m vertikalne dubine zbog prisutnosti zasićenja slojnom vodom proslojaka na 1301,5 m vertikalne dubine i pliče. U podinskom dijelu ta je granica postavljena na dubini 1317,9 m. Ekstrapolirana pojedinačna rješenja simulacije za maksimalne poluduljine frakture iz dijagrama ravnotežnih odnosa prikazana su u tablici 27. Slika 44. prikazuje dijagram ravnotežnih odnosa maksimalno ostvarenih poluduljina frakture, efektivnog tlaka i volumena prethodnice u funkciji veličine protoka prethodnice. Tu se vidi da globalno maksimalna poluduljina frakture, a da se pri tome ne premaše granične vrijednosti visine, postiže kod 0,795 m<sup>3</sup>/min (5 bbl/min) i utisnutog volumena prethodnice u iznosu od 10 m<sup>3</sup>. Efektivni tlak na razini perforacija pri tome iznosi 7,94 bar, a ostvarena hidraulička poluduljina frakture 27,02 m.

Tablica 27. Ekstrapolirana pojedinačna rješenja simulacije iz dijagrama ravnotežnih odnosa za točke maksimalne poluduljine frakture u ležištu PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

Protok	Vrijeme utiskivanja	Utisnuti volumen prethodnice	Efektivni tlak na razini perforacija	Tlak u bušotini	Poluduljina frakture	Srednja širina frakture	Gornja ekstenzija od centra inicijacije frakture	Dubina vrha frakture	Doljna ekstenzija od centra inicijacije frakture	Dubina dna frakture
(m <sup>3</sup> /min)	(min)	(m <sup>3</sup> )	(bar)	(bar)	(m)	(mm)	(m)	(m)	(m)	(m)
0,159	62,90	10,00	8,79	212,23	16,52	3,2	6,24	1303,97	3,61	1313,83
0,318	31,45	10,00	8,53	211,98	20,97	3,4	7,11	1303,10	4,01	1314,23
0,477	20,97	10,00	8,00	211,48	22,98	3,5	8,09	1302,12	4,86	1315,08
0,636	15,73	10,00	7,99	211,48	25,32	3,6	8,25	1301,96	5,19	1315,41
0,795	12,58	10,00	7,94	211,45	27,02	3,7	8,52	1301,69	5,45	1315,67
0,954	9,50	9,06	7,88	211,41	26,95	3,7	8,81	1301,41	5,48	1315,69
1,113	7,20	8,01	7,89	211,41	26,32	3,7	8,83	1301,38	5,49	1315,70
1,272	5,60	7,12	7,91	211,43	25,63	3,7	8,79	1301,43	5,49	1315,71
1,431	4,60	6,58	7,92	211,45	25,32	3,7	8,78	1301,43	5,51	1315,72
1,590	3,80	6,04	7,93	211,45	24,77	3,7	8,79	1301,43	5,51	1315,72
1,749	3,20	5,60	7,95	211,48	24,33	3,7	8,71	1301,50	5,51	1315,73
1,908	2,80	5,34	7,95	211,48	24,14	3,7	8,75	1301,46	5,53	1315,74



Slika 44. Dijagram ravnotežnih odnosa maksimalno ostvarenih poluduljina frakture, efektivnog tlaka i volumena prethodnice u funkciji veličine protoka prethodnice za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

#### 4.4.6. Modeliranje teoretski optimalne geometrije frakture

Proračun je proveden u tabličnom kalkulatoru sukladno proceduri *UFD* prezentiranoj u poglavlju 3.1.10. Ulazni podaci za proračun prikazani su u tablici 28.

Tablica 28. Ulazni podaci za proračun maksimalnog indeksa proizvodnosti i teoretski optimalne geometrije frakture po *UFD* proceduri na ležištu PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

<b>pVT</b>			
Srednji ležišni tlak	$p_R$	bar	122,97
Ležišna temperatura	$t_R$	°C	40,40
Relativna gustoća plina	$g_g$		0,5578
Odnos kondenzata i plina	CGR	$m^3/m^3$	0,00
Gustoća kondenzata	$r_c$	$kg/m^3$	750,00
Odnos vode i plina	WGR	$m^3/m^3$	0,015
Relativna gustoća vode	$\gamma_w$		1,01
Molni udio H <sub>2</sub> S		%	0,00
Molni udio CO <sub>2</sub>		%	0,02
Molni udio N <sub>2</sub>		%	0,67
Korelacija za viskozitet (0 - Lee at al.; 1 - Carr at al.)		Carr at al.	1
<b>Ležište PLQ-F (HDM iz ožujka 2015.)</b>			
Moćnost ležišta u FP intervalu (1303,05 mTVD - 1315,65 mTVD)	$(k_g h_{ef})_{FP}$	mD m	63,46
Efektivna propusnost za plin FP intervala	$k_{g,FP}$	mD	16,48
Efektivna debljina ležišta FP intervala iz TLA analize	$(h_{ef})_{FP}$	m	3,85
Drenažni radius bušotine	$r_e$	m	300
Polumjer bušotine	$r_w$	m	0,10795
Visina perforacija (mjerene duljine)	$h_p$	m	7,00
Perforirani interval (1373,0 mMD - 1380,0 mMD)		mTVD	1306,1-1312,6
Ukupni skin efekt	$s_t$		-2,08
<b>Fraktura</b>			
Interval frakture (puna visina ležišta PLQ-F vertikalne duljine)		m	1305,37 - 1314,29
Procijenjena visina frakture (puna vertikalna debljina ležišta)	$h_f$	m	8,92
Vertikalna dubina sredine perforacija	TVD	m	1309,35
Frakturni gradijent ležišta	$G_f$	bar/10 m	1,56
Moćnost ležišta za plin po visini frakture (iz HDM 2015.)	$k_g h_{ef}$	mD m	63,46
Efektivna (propusna) debljina ležišta po visini frakture (iz TLA)	$h_{ef}$	m	8,92
Efektivna propusnost samo propusnog dijela ležišta po visini frakture	$k_g$	mD	7,11
Porozitet podupirača	$\Phi_{prop}$	%	30%
Gustoća podupirača	$\rho_{prop}$	$kg/m^3$	2700
Očekivana koncentracija podupirača po visini pukotine	$m_{prop}$	$kg/m$	624
Procjenjeni gubitak permeabiliteta radi oštećenje rad. fluidom		%	10
Pretpostavljeni dinamički tlak tijekom proizvodnje (iz WT 2015.)	$p_{wf}$	bar	112,09

Proračun je proveden iterativnim postupkom mijenjajući masu utisnutog podupirača (broja podupirača) po punoj visini ležišta 8,92 m i efektivne propusnosti za plin 7,11 mD do postizanja maksimalne poluduljine frakture za svaki razmatrani protok prethodnice. Pretpostavljeno je da nema dodatnih oštećenja u vidu za frakture karakterističnih *skinova*. Na kraju je izračunata vrijednost dobitka na proizvodnosti u odnosu na mjerenu proizvodnost iz

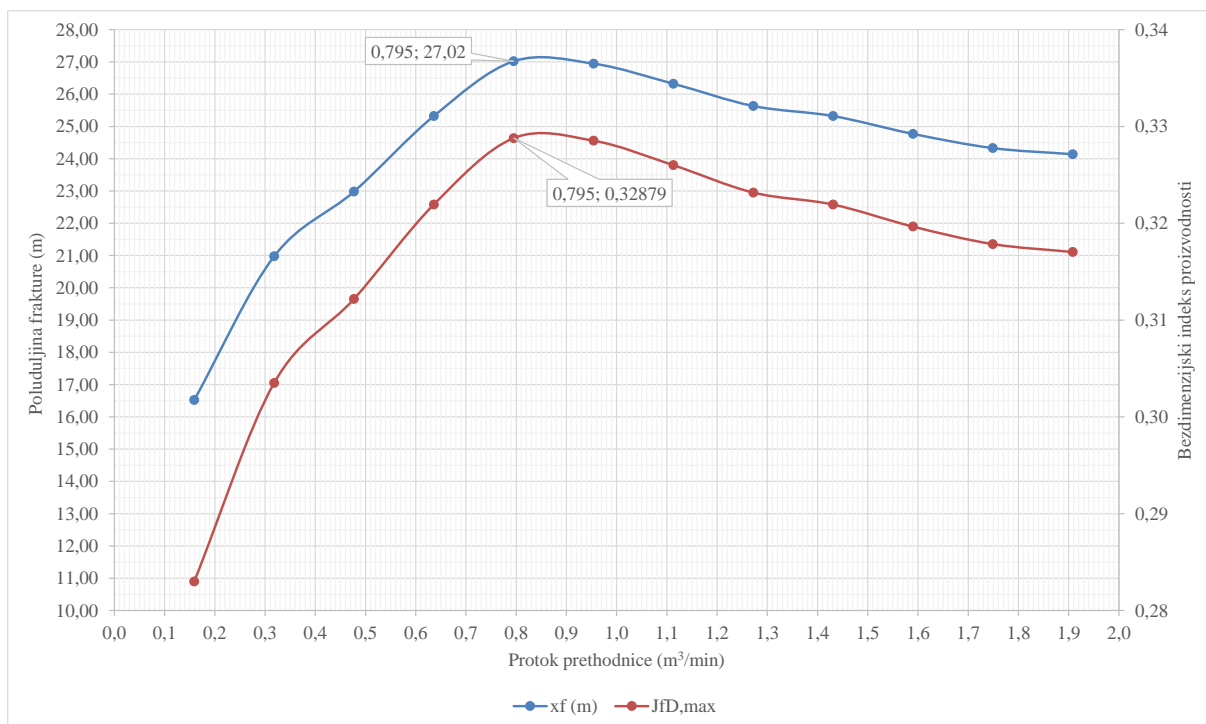
ožujka 2015. Rezultati proračuna teoretski optimalne geometrije frakture za svaki razmatrani protok prethodnice prikazani su u tablici 29.

Tablica 29. Rezultati proračuna teoretski optimalne geometrije frakture za svaki razmatrani protok prethodnice za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

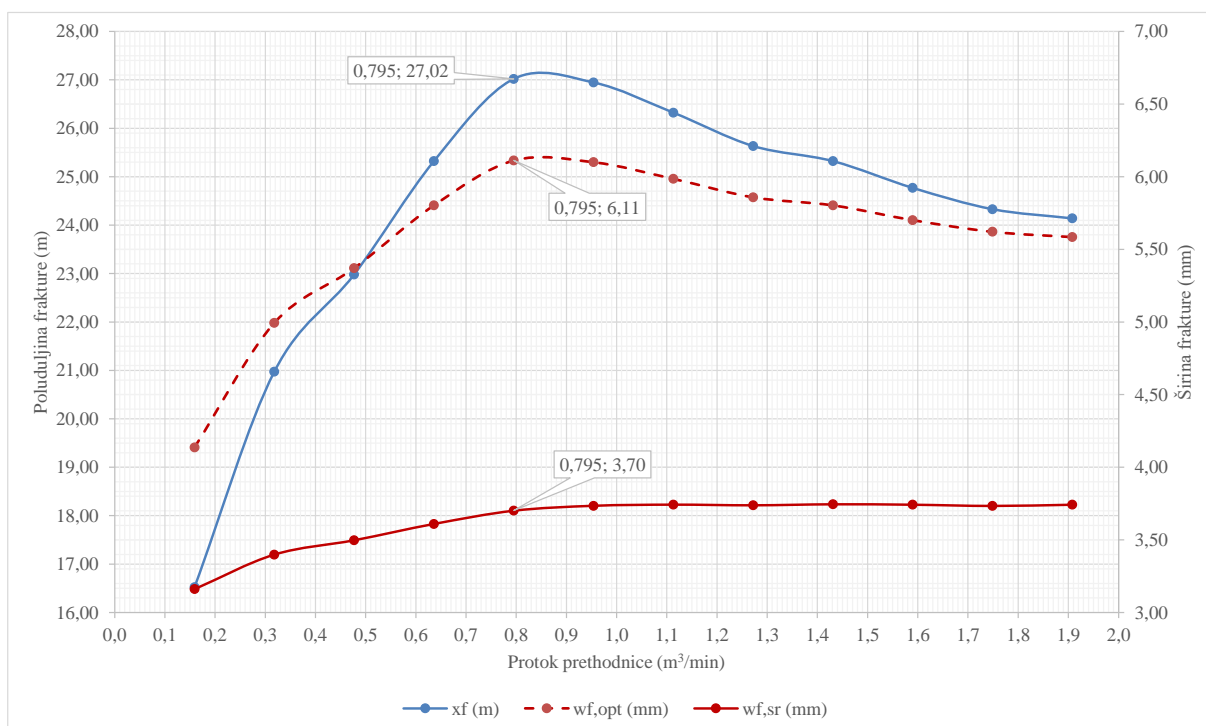
3D simulator	$Q_{pret}$	(bbl/min)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	$Q_{pret}$	( $m^3/min$ )	0,159	0,318	0,477	0,636	0,795	0,954	1,113	1,272	1,431	1,590	1,749	1,908
	$V_{pret}$	( $m^3$ )	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	9,06	8,01	7,12	6,58	6,04	5,60	5,34
	$t_{pret}$	(min)	62,90	31,45	20,97	15,73	12,58	9,50	7,20	5,60	4,60	3,80	3,20	2,80
	$x_f$	(m)	16,52	20,97	22,98	25,32	27,02	26,95	26,32	25,63	25,32	24,77	24,33	24,14
	$w_{f,sr}$	(mm)	3,16	3,40	3,50	3,61	3,70	3,73	3,74	3,74	3,74	3,74	3,73	3,74
	$V_f$	( $m^3$ )	0,837	1,296	1,697	2,008	2,287	2,350	2,304	2,232	2,209	2,158	2,103	2,098
	$m_{prop,ef}$	(kg)	2 304	3 531	4 161	4 955	5 568	5 544	5 313	5 062	4 955	4 761	4 612	4 545
$V_{f,ef}$	( $m^3$ )	1,219	1,868	2,202	2,622	2,946	2,933	2,811	2,678	2,622	2,519	2,440	2,405	
$k_{f,ef}$	(mD)	45 452	47 800	48 709	49 675	50 322	50 298	50 061	49 793	49 675	49 455	49 278	49 197	
$N_{prop}$		0,00618	0,00995	0,01195	0,01452	0,01652	0,01644	0,01569	0,01487	0,01452	0,01389	0,01340	0,01319	
$C_{fD,opt}$		1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	
$J_{fD,max}$		0,28300	0,30349	0,31217	0,32193	0,32879	0,32853	0,32600	0,32317	0,32193	0,31965	0,31785	0,31703	
$FOI_{max}$		1,44	1,55	1,59	1,64	1,68	1,68	1,66	1,65	1,64	1,63	1,62	1,62	
$x_{f,opt}$	(m)	16,52	20,97	22,98	25,32	27,02	26,95	26,32	25,63	25,32	24,77	24,33	24,14	
$w_{f,opt}$	(mm)	4,14	4,99	5,37	5,80	6,11	6,10	5,99	5,86	5,80	5,70	5,62	5,58	
$S_{ff}$		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
$S_{ck,w}$		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
$S_{ck,k}$		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
$J_{fD}$		0,28300	0,30349	0,31217	0,32193	0,32879	0,32853	0,32600	0,32317	0,32193	0,31965	0,31785	0,31703	
$S_f$		-3,65	-3,88	-3,98	-4,07	-4,14	-4,14	-4,11	-4,09	-4,07	-4,05	-4,03	-4,03	
$FOI$		1,44	1,55	1,59	1,64	1,68	1,68	1,66	1,65	1,64	1,63	1,62	1,62	
$q_{gsc,r}$	( $m^3/dan$ )	87 649	93 996	96 683	99 706	101 830	101 749	100 965	100 089	99 706	99 001	98 441	98 187	
$q_{gsc,HDM}$	( $m^3/dan$ )	60 670	60 670	60 670	60 670	60 670	60 670	60 670	60 670	60 670	60 670	60 670	60 670	
$Pogr.$	(%)	0,00134	0,00341	0,00039	0,00303	0,00679	0,00411	0,00083	0,00232	0,00303	0,00096	0,00001	0,00005	

Funkcionalnu zavisnost kretanja vrijednosti maksimalne poluduljine frakture i maksimalnih bezdimenzijskih indeksa proizvodnosti u odnosu na veličine protoka prethodnice može se vidjeti na slici 45. Globalni maksimum događa se kod vrijednosti protoka 0,795  $m^3/min$ . Slika 46. daje komparativan prikaz kretanja vrijednosti srednje širine frakture iz simulacije utiskivanja prethodnice i teoretski optimalne širine frakture. Očitavanjem vrijednosti rezultata proračuna iz tablice 29. maksimalno moguća teoretska vrijednost bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti u iznosu 0,32879 postiže se kod podupiračem ispunjene frakture poluduljine 27,02 m, širine 6,11 mm i u propusnoj visini ležišta 8,92 m. Efektivna propusnost podupirača/frakture zbog efekta turbulencije plina procijenjena je na 50 322 mD, što u konačnici uz srednju propusnost ležišta od 7,11 mD, daje ciljanu optimalnu bezdimenzijsku provodljivost frakture 1,6. Dobitak na proizvodnosti ovakvog dizajna u odnosu na izvedeno stanje iznosi 1,68.

Rezultati kompletnog proračuna provedenog prema *UFD* proceduri nalaze se u tablici 66., i tablici 67. priloga 7.



Slika 45. Zavisnost kretanja vrijednosti maksimalnih poluduljina frakture i odnosnih teoretski maksimalnih bezdimenzijskih indeksa proizvodnosti u funkciji protoka prethodnice za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.



Slika 46. Zavisnost kretanja vrijednosti maksimalnih poluduljina frakture i vrijednosti srednje širine iz simulacije utiskivanja prethodnice i teoretski optimalne širine frakture ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

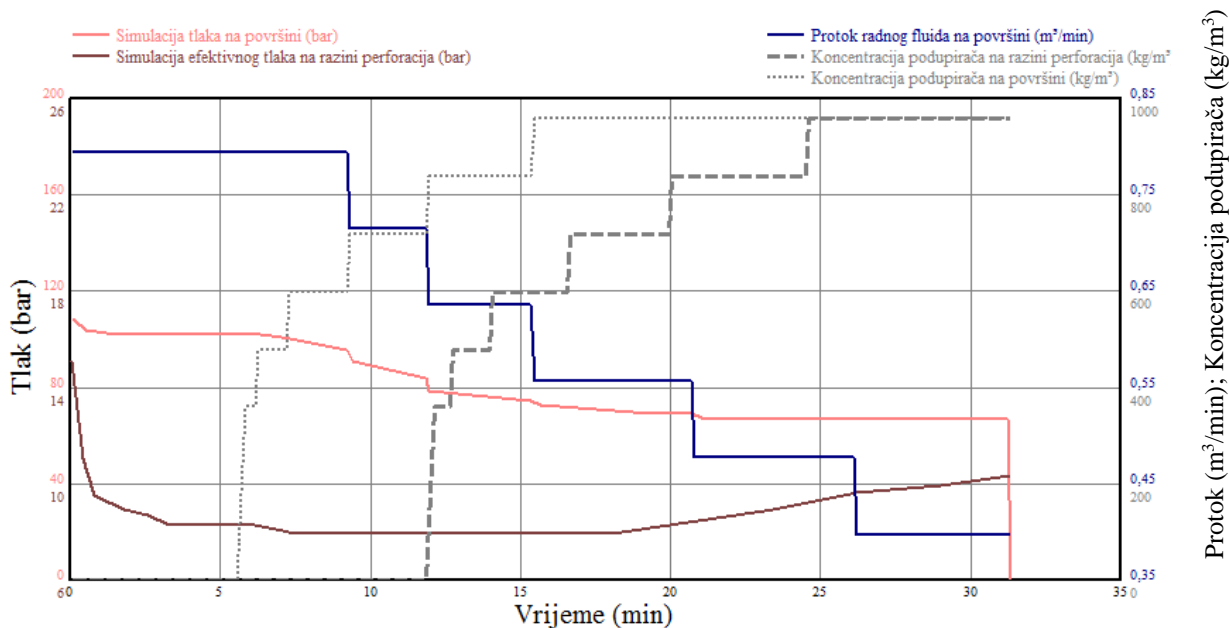
#### 4.4.7. Izrada optimalnog programa izvođenja hidrauličkog frakturiranja

Zadatak optimalnog dizajna hidrauličkog frakturiranja je da pomoću prethodnice volumena  $10 \text{ m}^3$  i protoku  $0,795 \text{ m}^3/\text{min}$  (5 bbl/min) formira frakturu gdje će do zapunjenja njenog vrha podupiračem doći kod poluduljine 27,02 m. Zbog prodora u neželjene zone efektivni tlak na razini perforacija u trenutku postizanja ciljane poluduljine ne smije prerasti vrijednost 7,94 bar. U drugoj fazi zadatak je da „napuhne“ i zapuni frakturu podupiračem od početnih 3,7 mm srednje širine formirane prethodnicom do 6,11 mm optimalne širine. Pri tome bezdimenzijska provodljivost frakture treba iznositi 1,6. Optimalni program izvođenja hidrauličkog frakturiranja prikazan je u tablici 30.

Tablica 30. Optimalni program izvođenja hidrauličkog frakturiranja za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

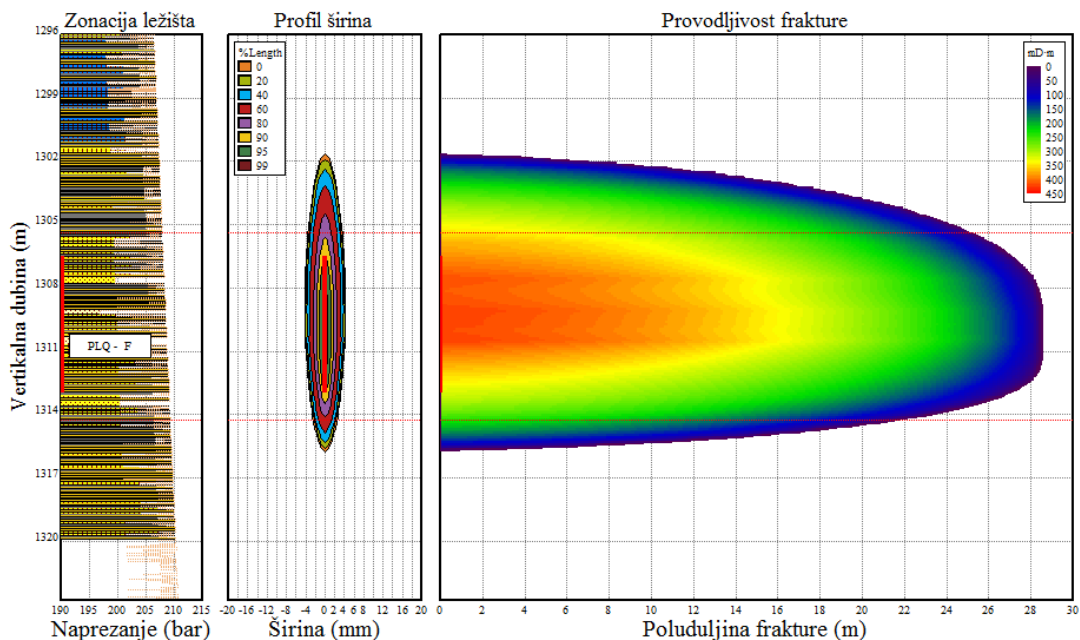
Redni broj ili naziv koraka	Protok radnog fluida na površini	Protok kaše na razini perforacija	Volumen radnog fluida	Volumen kaše	Ukupni volumen kaše	Ukupno vrijeme	Radni fluid	Podupirač	Koncentracija podupirača od:	Koncentracija podupirača do:	Masa podupirača u koraku (kg)
	( $\text{m}^3/\text{min}$ )	( $\text{m}^3/\text{min}$ )	( $\text{m}^3$ )	( $\text{m}^3$ )	( $\text{m}^3$ )	(min)			( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	
Bušotina	0,795	0,795	4,84	4,84	4,84	6,09	24 mPas	0	0	0	0
1	0,795	0,758	4,40	4,40	9,24	11,90	24 mPas	0	0	0	0
2	0,795	0,636	0,05	0,05	9,29	11,98	24 mPas	30/50	119,83	119,83	6
3	0,795	0,636	0,10	0,11	9,40	12,15	24 mPas	30/50	239,65	239,65	24
4	0,795	0,636	0,30	0,34	9,74	12,68	24 mPas	30/50	359,48	359,48	108
5	0,795	0,636	0,70	0,82	10,56	13,98	24 mPas	30/50	479,31	479,31	336
6	0,715	0,598	1,30	1,59	12,15	16,64	24 mPas	30/50	599,13	599,13	779
7	0,636	0,556	1,50	1,90	14,05	20,05	24 mPas	30/50	718,96	718,96	1078
8	0,556	0,489	1,70	2,23	16,28	24,61	24 mPas	30/50	838,79	838,79	1426
9	0,477	0,415	2,05	2,78	19,06	31,31	24 mPas	30/50	958,61	958,61	1969
10	0,397										
			Ukupno: 16,94	19,06							Ukupno: 5726

Kao radni fluid korištena je vodena otopina viskozno-elastične površinsko aktivne tvari (engl. VES) viskoznosti 24 mPa s. Za podupirač frakture korišten je sintetizirani pijesak srednje veličine, promjera zrna  $445 \mu\text{m}$  (engl. 30-50 US Mesh Size Range) koji je ujedno i filtracijski medij pješčanog zasipa. Projektiran je stepeničast rast koncentracije podupirača u suspenziji do maksimalno 958,61 kg dodanog podupirača na  $1 \text{ m}^3$  radnog fluida (8 PPA) i ostvarenim protocima od početnih  $0,795 \text{ m}^3/\text{min}$  (5 bbl/min) u prvoj fazi, te stepeničastim smanjenjem protoka do završno  $0,477 \text{ m}^3/\text{min}$  (2,5 bbl/min) u drugoj fazi programa. Grafički prikaz programa nalazi se na slici 47.



Slika 47. Grafički prikaz programa izvođenja optimalne frakture i simulacija ponašanja tlaka na površini i efektivnog tlaka na razini perforacija za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

Rezultati simulacije optimalnog programa izvođenja hidrauličkog frakturiranja prikazani su u tablici 31., dok se vizualni prikaz optimalne geometrije i optimalne provodljivosti frakture nalazi na slici 48. Dijagram rasta visine i širine frakture u funkciji ostvarene poluduljine frakture dan je na slici 49., a profil srednje provodljivosti optimalno dizajnirane frakture u funkciji njene poluduljine na slici 50.

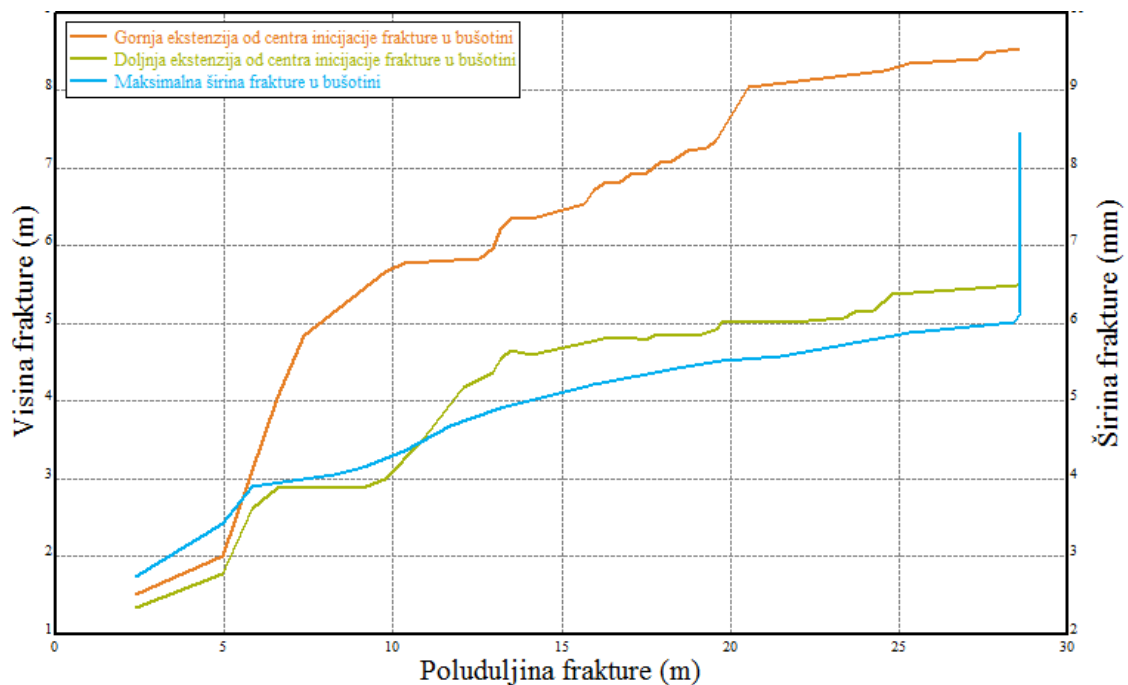


Slika 48. Profil širine i provodljivosti optimalno dizajnirane frakture u funkciji poluduljine (visina/dubina i poluduljina frakture u omjeru 1:1) za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

Tablica 31. Rezultati simulacije glavnih parametara optimalno dizajnirane frakture za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

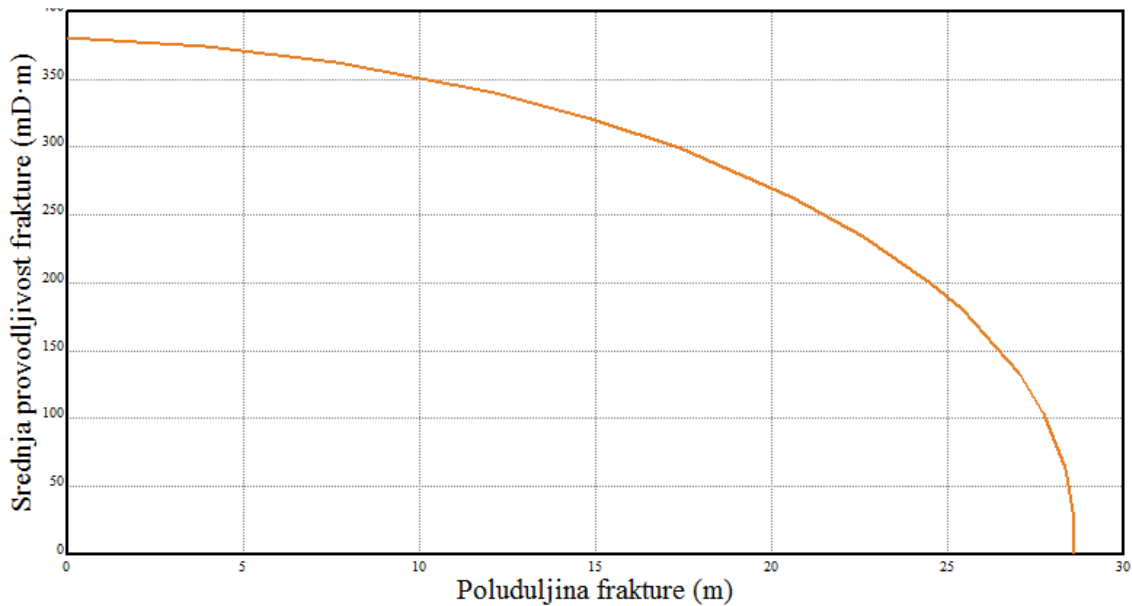
**Parametri optimalno dizajnirane frakture**

Utisnuti volumen kaše	(m <sup>3</sup> )	19,064
Utisnuti volumen radnog fluida	(m <sup>3</sup> )	16,943
Volumen radnog fluida utisnut u formaciju	(m <sup>3</sup> )	15,592
Efikasnost radnog fluida		18,2%
Efektivni tlak na razini perforacija	(bar)	10,33
Hidraulička (kreirana) poluduljina frakture	(m)	28,62
Gornja ekstenzija od centra inicijacije frakture u bušotini	(m)	8,55
Doljna ekstenzija od centra inicijacije frakture u bušotini	(m)	5,56
Vertikalna dubina vrha frakture u bušotini	(m)	1301,70
Vertikalna dubina dna frakture u bušotini	(m)	1315,80
Ukupna visina frakture u bušotini	(m)	14,10
Maksimalna hidraulička širina frakture u bušotini	(mm)	8,46
Srednja hidraulička širina frakture u bušotini	(mm)	5,25
Poluduljina frakture ispunjena podupiračem	(m)	27,01
Srednja visina frakture ispunjena podupiračem	(m)	11,52
Srednja visina frakture u ležištu PLQ - F ispunjena podupiračem	(m)	8,84
Srednja širina frakture ispunjena podupiračem	(mm)	7,56
Srednja širina frakture u ležištu PLQ - F ispunjena podupiračem	(mm)	6,12
Srednja koncentracija podupirača u frakturi	(kg/m <sup>2</sup> )	8,65
Srednja koncentracija podupirača u ležištu PLQ - F	(kg/m <sup>2</sup> )	10,00
Provodljivost frakture u ležištu PLQ - F	(mD·m)	307,99
Bezdimezijska provodljivost u frakture ležištu PLQ - F		1,604
Srednja propusnost frakture za plin	(mD)	50322
Vrijeme zaustavljanja rasta frakture (engl. <i>Tip Screen Out Time</i> )	(min)	17,81



Slika 49. Dijagram rasta visina i širina u funkciji ostvarene poluduljine frakture za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.





Slika 50. Profil srednje provodljivosti optimalno dizajnirane frakture u funkciji poluduljine frakture za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

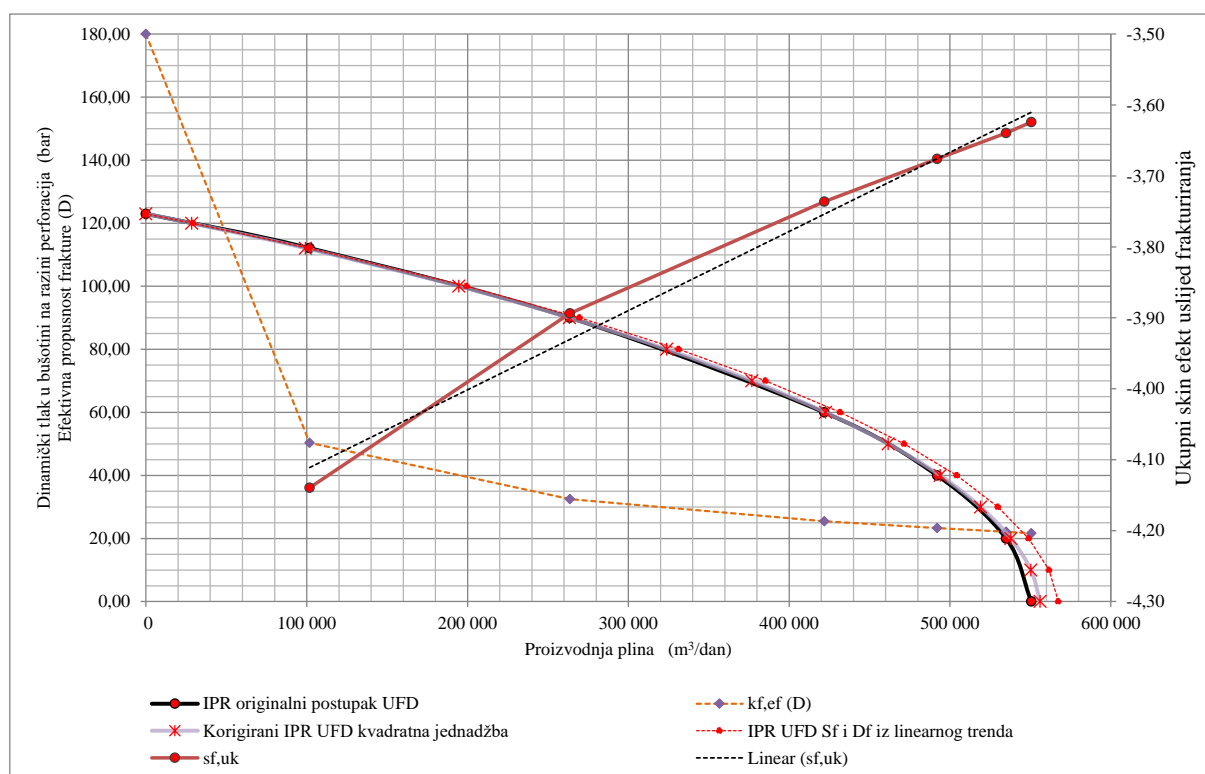
#### 4.4.8. Izrada *FP* proizvodnog modela

Naposljetku je na način kako je opisano u poglavlju 3.1.11 izrađen proizvodni model. Proizvodnim modelom određen je ukupni *skin* efekt koji u sebi uključuje sve komponente, znači linearnu komponentu i nelinearna odstupanja zbog efekta turbulencije plina, oboje kroz frakturu, perforacije i sustav pješanog zasipa. Postupak je proveden u punom rasponu dinamičkih tlakova u bušotini za konstantne vrijednosti optimalne poluduljine frakture dobivene simulacijom hidrauličkog frakturiranja  $x_{f,opt} = 27,01\text{ m}$ , optimalne širine frakture  $w_{opt} = 6,12\text{ mm}$  i srednje visine frakture  $h_{ef,f} = 8,84\text{ m}$ . Ulazni podaci prikazani su u tablici 28., a rezultati UFD proračuna nalaze se u tablici 69. priloga 7.

Valorizacija vrijednosti linearnog *skina* uslijed frakturiranja  $s_{UFD,Opt.}$  i vrijednosti efekta visokih brzina protjecanja plina u frakturi  $D_{UFD,Opt.}$  provedena je na način kako je opisano u poglavlju 3.1.10. Linearna regresija provedena je za vrijednosti protoka plina u ograničenom rasponu proizvodnje od 197 941 m<sup>3</sup>/dan do maksimalne vrijednosti 550 552 m<sup>3</sup>/dan. Zadržavajući dobivenu vrijednost nagiba pravca (tablica 68., prilog 7.), odnosno koeficijenta turbulencije plina  $D_f$ , provedena je dodatna kalibracija vrijednosti linearnog *skin* efekta  $S_f$  gdje se korekcijom od vrijednosti -4,17 na -4,05 postiže gotovo potpuno preklapanje krivulja. Tablica 32. i slika 51. prikazuju rezultate tih proračuna.

Tablica 32. Zavisnost tlakova u bušotini i proizvodnje plina te vrijednosti komponenti *skina* kod posljedice frakturiranja optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir prema UFD proceduri.

$p_{wf}$ (bar)	$q_{gSC,f}$ (m <sup>3</sup> /dan)	$s_{f,uk}$	$s_f$	$D_f q_{gSC}$	$k_{f,ef}$ (mD)
122,97	0		-4,05	4,050000	180 000
112,09	101 808	-4,14	-4,05	-0,088568	50 325
90,00	263 599	-3,89	-4,05	0,157496	32 474
60,00	421 651	-3,73	-4,05	0,315049	25 452
40,00	491 837	-3,67	-4,05	0,375200	23 314
20,00	534 670	-3,64	-4,05	0,411709	22 131
0,00	550 351	-3,62	-4,05	0,427339	21 648



Slika 51. Indikatorska krivulja optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir i pravac linearne regresije ovisnosti ukupnog *skina* uslijed frakturiranja o veličini protoka plina.

Jednadžba pravca ima sljedeći oblik:

$$s_{UFD,Opt,t} = s_{UFD,Opt} + D_{UFD,Opt} \cdot q_{gSC,UFD,Opt} = -4,05 + 1,1169 \times 10^{-6} \left( \frac{m^3}{dan} \right)^{-1} \times q_{gSC,UFD,Opt} \left( \frac{m^3}{dan} \right).$$

Rezultati proračuna proizvodnosti optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F prikazani su u tablici 33.

Tablica 33. Rezultati proračuna proizvodnog modela temeljem *UFD* procedure optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir

$P_{wf}$	$\bar{\mu}_g$	$\bar{Z}$	$s_{UFD,Opt.}$	$D_{UFD,Opt.}$	$s_{UFD,Opt.,t}$	$a_{UFD,Opt.}$	$b_{UFD,Opt.}$	$q_{gSC,UFD,Opt.}$	$J_{D,UFD,Opt.}$	$FOI_{UFD,Opt.}$
(bar)	(mPa s)			(m <sup>3</sup> /dan) <sup>-1</sup>		(Pa <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> /s) <sup>-1</sup> )	(Pa <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> /s) <sup>-2</sup> )	(m <sup>3</sup> /dan)		
0,00	0,012477	0,895956	-4,05	1,1169E-06	-3,43	1,9606E+13	6,0446E+11	556 036	0,266604	1,36
10,00	0,012645	0,888755	-4,05	1,1169E-06	-3,44	1,9710E+13	6,0767E+11	550 366	0,267055	1,36
20,00	0,012829	0,881793	-4,05	1,1169E-06	-3,45	1,9840E+13	6,1169E+11	537 841	0,268056	1,37
30,00	0,013013	0,875116	-4,05	1,1169E-06	-3,47	1,9972E+13	6,1576E+11	519 056	0,269572	1,38
40,00	0,013197	0,868730	-4,05	1,1169E-06	-3,50	2,0107E+13	6,1992E+11	493 936	0,271626	1,39
50,00	0,013404	0,862665	-4,05	1,1169E-06	-3,53	2,0280E+13	6,2526E+11	461 641	0,274314	1,40
60,00	0,013618	0,856906	-4,05	1,1169E-06	-3,58	2,0467E+13	6,3101E+11	422 616	0,277633	1,42
70,00	0,013832	0,851505	-4,05	1,1169E-06	-3,63	2,0657E+13	6,3686E+11	376 834	0,281631	1,44
80,00	0,014045	0,846466	-4,05	1,1169E-06	-3,69	2,0851E+13	6,4286E+11	323 921	0,286398	1,46
90,00	0,014258	0,841814	-4,05	1,1169E-06	-3,76	2,1051E+13	6,4902E+11	263 401	0,292052	1,49
100,00	0,014471	0,837542	-4,05	1,1169E-06	-3,83	2,1258E+13	6,5540E+11	194 617	0,298754	1,53
112,09	0,014729	0,832917	-4,05	1,1169E-06	-3,94	2,1517E+13	6,6339E+11	99 180	0,308581	1,58
120,00	0,014899	0,830201	-4,05	1,1169E-06	-4,02	2,1694E+13	6,6883E+11	28 423	0,316294	1,61
122,97	0,014961	0,829262	-4,05	1,1169E-06	-4,05	2,1760E+13	6,7089E+11	0	0,319502	1,63

U nastavku su prikazani ulazni podaci i rezultati proračuna linearnih i nelinearnih oštećenja koja se događaju u perforacijama i anularnom pješčanom zasipu.

Tablica 34. Ulazni parametri za proračun oštećenja kao posljedice protjecanja plina u perforacijama optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

Unutarnji promjer proizvodne kolone zaštitnih cijevi	$r_c$	m	0,0797
Visina perforacija	$h_p$	m	7,00
Gustoća perforiranja		perf./m	39,00
Broj perforacija	$n_p$		273,00
Duljina perforacije (promjer dlijeta - unutarnji promjer proiz. kolone)	$L_p$	m	0,1362
Promjer perforacija	$D_p$	m	0,0211
Efektivna propusnost za plin podupirača u perforacijama	$k_G$	mD	180000
Faktor turbulencije u perforacijama	$\beta_G$	m <sup>-1</sup>	40530

Tablica 35. Vrijednosti linearnog *skin* efekta uslijed protjecanja u perforacijama i odgovarajućeg efekta visokih brzina protjecanja fluida optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

Linearni skin efekt zbog pješčanog zasipa	$S_G$		0,0032
Koeficijent turbulencije pješčanog zasipa	$D_G$	(m <sup>3</sup> /dan) <sup>-1</sup>	1,2851E-07

Tablica 36. Ulazni parametri za proračun oštećenja kao posljedice protjecanja plina u anularnom sustavu pješčanog zasipa optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

Unutarnji promjer proizvodne kolone	$r_c$	m	0,0797
Vertikalna visina filtra	$h_{scr}$	m	12,00
Vanjski promjer filtra	$r_{so}$	m	0,0550
Unutarnji promjer filtra	$r_{si}$	m	0,0445
Efektivna propusnost za plin pijeska-propanta anularnom prostoru	$k_{GP}$	mD	180000
Faktor turbulencije u anularnom prostoru	$b_{GP}$	m <sup>-1</sup>	40530
Efektivna propusnost za plin filtra pješčanog zasipa	$k_s$	mD	180000
Faktor turbulencije u anularnom prostoru	$\beta_{scr}$	m <sup>-1</sup>	40530

Tablica 37. Vrijednosti *skin* efekta uslijed linearnog protjecanja u sustavu anularnog pješčanog zasipa i odgovarajućeg efekta visokih brzina protjecanja fluida optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

Linearni skin efekt zbog anularnog pješčanog zasipa	$S_{CP}$		0,0000109
Koeficijent turbulencije anularnog pješčanog zasipa	$D_{CP}$	$[\text{m}^3/\text{dan}]^{-1}$	1,5008E-11

Na kraju, rezultati izračuna ukupnog linearnog *skin* faktora i odgovarajućeg ukupnog efekta visokih brzina protjecanja fluida prikazani su u tablici 38.

Tablica 38. Vrijednosti ukupnog linearni *skin* faktora i odgovarajućeg ukupnog efekta visokih brzina protjecanja fluida optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir opremljenog tehnikom *FP*.

Ukupni linearni skin efekt ( $S_f + S_G + S_{CP}$ )	$S_{FP,Opt.}$		-4,04682
Ukupni koeficijent turbulencije ( $D_f + D_G + D_{CP}$ )	$D_{FP,Opt.}$	$(\text{m}^3/\text{dan})^{-1}$	1,24538E-06

Temeljem dobivenih vrijednosti linearnog *skina* kao posljedice primjene tehnike *FP*  $S_{FP,Opt.}$  i vrijednosti efekta visokih brzina protjecanja plina  $D_{FP,Opt.}$  izrađen je proizvodni model optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F. Rezultati proračuna prikazani su u tablici 39.

Tablica 39. Rezultati proračuna proizvodnog modela optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir opremljenog tehnikom *FP*.

$P_{wf}$	$\bar{\mu}_g$	$\bar{Z}$	$S_{FP,Opt.}$	$D_{FP,Opt.}$	$S_{FP,Opt.,J}$	$a_{FP,Opt.}$	$b_{FP,Opt.}$	$q_{gSC,FP,Opt.}$	$J_{D,FP,Opt.}$	$FOI_{FP,Opt.}$
(bar)	(mPa s)			$(\text{m}^3/\text{dan})^{-1}$		$(\text{Pa}^2 (\text{m}^3/\text{s})^{-1})$	$(\text{Pa}^2 (\text{m}^3/\text{s})^2)$	$(\text{m}^3/\text{dan})$		
0,00	0,012477	0,895956	-4,05	1,2454E-06	-3,37	1,9626E+13	6,7402E+11	546 826	0,262188	1,34
10,00	0,012645	0,888755	-4,05	1,2454E-06	-3,37	1,9730E+13	6,7760E+11	541 312	0,262661	1,34
20,00	0,012829	0,881793	-4,05	1,2454E-06	-3,39	1,9860E+13	6,8208E+11	529 125	0,263712	1,35
30,00	0,013013	0,875116	-4,05	1,2454E-06	-3,41	1,9993E+13	6,8662E+11	510 841	0,265306	1,35
40,00	0,013197	0,868730	-4,05	1,2454E-06	-3,44	2,0127E+13	6,9125E+11	486 374	0,267468	1,37
50,00	0,013404	0,862665	-4,05	1,2454E-06	-3,48	2,0301E+13	6,9721E+11	454 890	0,270303	1,38
60,00	0,013618	0,856906	-4,05	1,2454E-06	-3,53	2,0488E+13	7,0363E+11	416 801	0,273813	1,40
70,00	0,013832	0,851505	-4,05	1,2454E-06	-3,58	2,0678E+13	7,1015E+11	372 051	0,278057	1,42
80,00	0,014045	0,846466	-4,05	1,2454E-06	-3,65	2,0872E+13	7,1684E+11	320 233	0,283137	1,45
90,00	0,014258	0,841814	-4,05	1,2454E-06	-3,72	2,1072E+13	7,2371E+11	260 824	0,289195	1,48
100,00	0,014471	0,837542	-4,05	1,2454E-06	-3,81	2,1279E+13	7,3082E+11	193 100	0,296425	1,51
112,09	0,014729	0,832917	-4,05	1,2454E-06	-3,92	2,1539E+13	7,3973E+11	98 713	0,307127	1,57
120,00	0,014899	0,830201	-4,05	1,2454E-06	-4,01	2,1716E+13	7,4580E+11	28 362	0,315620	1,61
122,97	0,014961	0,829262	-4,05	1,2454E-06	-4,05	2,1782E+13	7,4809E+11	0	0,319178	1,63

#### 4.4.9. Diskusija o rezultatima istraživanja u bušotini SJ – 2 Dir

##### *Diskusija o rezultatima simulacija hidrauličkog frakturiranja*

Za analizu rezultata simulacije hidrauličkog frakturiranja treba naglasiti da značajna prisutnost zasićenja slojnom vodom u krovinskom dijelu počinje na dubini 1301,5 m vertikalne dubine i pliće. U podinskom dijelu ta je granica na dubini 1317,9 m.






Analizira li se slika 37. koja se odnosi na simulaciju temeljenu na originalnoj zonaciji, i odgovarajuće krivulje na slici 42. i slici 43. vidljivo je da se u rasponu vremena od 3. do 23. minute krivulje efektivnog tlaka vrlo dobro poklapaju. Srednja vrijednost razlike je -0,12 bar ili -0,63 %. Nakon 23. minute dolazi da naglog pada efektivnog tlaka kojeg ne prati simulacijski model. Ovakav pad tlaka karakteristika je nekontroliranog rasta frakture po visini. Takvo ponašanje upućuje na zaključak da postoji određeno odstupanje u zonaciji modela i stvarnog stanja u ležištu. Koliko je i kakvo odstupanje (u zonaciji) teško je reći budući da su karotažna mjerenja i relevantna interpretacija najbolje i jedino s čim se u tom trenutku raspolagalo. Budući da je iz proizvodnog historijata vidljivo je da je slojna voda od samog početka prisutna u proizvodnji i unatoč činjenici da je usklađena simulacija pokazala da je fraktura dosegla maksimalnu visinu na dubini 1301,8 m, postoji sumnja da je rast frakture bio dovoljan da dosegne zonu zasićenja slojnom vodom na 1301,5 m. Pogleda li se kompletan razvoj krivulja efektivnog tlaka od samog početka pa do kraja procesa hidrauličkog frakturiranja, srednja vrijednost razlike tlaka je -0,71 bar ili -4,00 %. Iako je ovdje uzeto u razmatranje, razdoblje do treće minute odnosi se na inicijaciju stvaranja frakture gdje su prisutni bušotinski efekti tako da se isto obično ne uključuje u analizu.

Vrlo slična odstupanja simuliranih vrijednosti prisutna su i kod modela temeljenog na TLA zonaciji. U rasponu vremena od 3. do 23. minute krivulje efektivnog tlaka se također vrlo dobro poklapaju gdje je srednja vrijednost razlike 0,24 bar, što čini odstupanje u iznosu 2,8 %. Analizira li se kompletan razvoj krivulja od samog početka pa do kraja procesa hidrauličkog frakturiranja, srednja vrijednost razlike tlaka je -0,32 bar, što čini odstupanje od -1,34 %.

I u slučaju kada se simulacija zasniva na TLA zonaciji, rezultirajuća krivulja efektivnog tlaka ne prati nagli pad nakon 23. minute. Budući da se TLA analiza bazira na istim karotažnim mjerenjima logično je ovakvo ponašanje jer je TLA analiza u suštini, analiza istog facijesa s istim ulaznim podacima samo znatno veće rezolucije. Ono u čemu se rezultati simulacije bitno razlikuju je geometrija frakture. Tablica 25. daje komparativni prikaz vrijednosti glavnih parametara simulacije frakture koje se temelje na originalnoj i TLA zonaciji. Razlika u rezultirajućim visinama frakture je 6,08 m u korist simulacije bazirane na TLA zonaciji. Rezultirajuća visina u ovom slučaju pokazuje snažan prodor frakture u vodeno zasićenje krovinskog područja dosega dubinu 1297,3 m. U isto vrijeme poluduljina fraktura je kraća za 33,21 m od poluduljine dobivene simulacijom koja se zasniva na originalnoj zonaciji. Razlog ovakvih rezultata leži u velikoj razlici u rezoluciji zonacije. Isto tako i u činjenici da postoje razlike u korigiranim vrijednostima geomehaničkih i filtracijskih svojstava

zona/proslojaka/litologija kod kojih je dobiveno usklađenje svakog modela zasebno. Vrijednosti postotnih razlika korigiranih geomehaničkih i filtracijskih svojstava *TLA* u odnosu na originalnu zonaciju prikazani su u tablici 40.

Tablica 40. Razlika korigiranih vrijednosti geomehaničkih i filtracijskih svojstava zona/proslojaka/litologija *TLA* u odnosu na originalnu zonaciju u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

Litologija		Odstupanje gradijenta naprezanja	Youngov modul elastičnosti	Poissonov omjer	Žilavost	Efektivni koeficijent filtracije
NAZIV	SIMBOL					
ŠEJL		-0,48%	2,50%	0,00%	10,83%	100,27%
SILT		-0,48%	2,50%	0,00%	5,00%	-48,25%
PRLJAVI PIJESAK						
PIJESAK		-0,49%	2,50%	0,00%	5,00%	126,86%
NEKONSOLIDIRANI PIJESAK						
Srednja vrijednost pijesaka:						108,04%

Tijekom postupka usklađivanja efektivnog tlaka najveći utjecaj na rezultat imali su gradijent naprezanja i efektivni koeficijent filtracije. Karakteristično je da već i kod malih promjena gradijenta naprezanja dolazi do značajnih odstupanja od mjenog tlaka. Za razliku od gradijenta naprezanja, kod efektivnog koeficijenta filtracije potrebne su relativno velike korekcije bez kojih je podudarnost nagiba krivulja tlaka bilo nemoguće postići. Žilavost, Poissonov omjer i Youngov modul elastičnosti manje su magnitude utjecaja na konačni rezultat. Ovo pravilo dobro je poznato u praksi. Dok je korekcija od -0,48% bila dovoljna kod gradijenta naprezanja, korekcija efektivnog koeficijenta filtracije kreće se u rasponu od -48,25% pa do 126,86% (za osrednjenu vrijednost svih pijesaka iznosi 108,04%). Ono što se usporedivši ova dva modela može zaključiti je da postoje velike razlike u simuliranim geometrijama frakture. Simulacija koja se zasniva na *TLA* zonaciji sugerira prodor u zone zasićene slojnom vodom, na što upućuje i proizvodni historijat, dok kod one koja se zasniva na originalnoj zonaciji to nije slučaj.

#### *Optimalni programa izvođenja hidrauličkog frakturiranja*

Usporedni prikaz ključnih proizvodnih parametara i geometrije optimalno dizajnirane frakture te istih teoretskih vrijednosti iz *UFD* proračuna nalazi se u tablici 41. Rezultati simulacije optimalnog programa izvođenja hidrauličkog frakturiranja pokazuju kako se pravilnim dizajnom moguće jako dobro približiti teoretski maksimalnim vrijednostima proizvodnosti. Vrijednosti odstupanja od idealnih iz *UFD* postupka su zanemarive, počevši od geometrije frakture gdje je odstupanje poluduljine frakture -0,03%, srednje visine frakture -

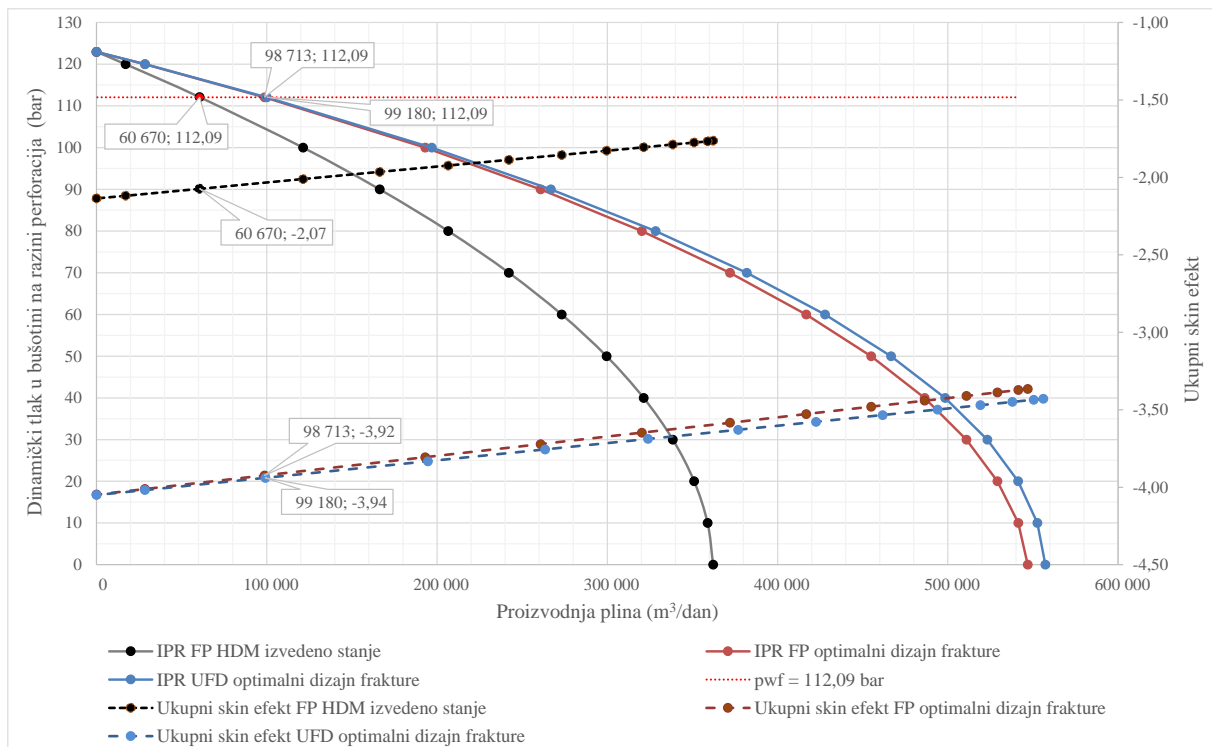
0,94% i optimalne srednje širine frakture 0,14%, pa do proizvodnih pokazatelja gdje je odstupanje ukupnog *skin* efekta i bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti 0,03%. Ovakav rezultat vodi k dobitku na proizvodnosti od 1,68 u odnosu na aktualno izvedeno stanje.

Tablica 41. Ključni proizvodni parametri i geometrija optimalno dizajnirane frakture i teoretskih maksimalnih vrijednosti i njihove razlike za ležište PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

		UFD model	3D simulator	Razlika
$m_{prop, ef}$	(kg)	5 568	5 522	-0,82%
$V_{prop-2krila}$	(m <sup>3</sup> )	2,946	2,922	-0,82%
$V_R$	(m <sup>3</sup> )	2 522 071	2 522 071	-
$k_{f,ef}$	(mD)	50 322	50 322	0,00%
$k_g$	(mD)	7,11	7,11	-0,06%
$N_{prop}$		0,01652	0,01639	-0,82%
$C_{fD,opt}$		1,600	1,604	0,23%
$J_{fD,max}$		0,32879	0,32890	0,03%
$FOI_{max}$		1,6784	1,6790	0,03%
$x_{f,opt}$	(m)	27,02	27,01	-0,03%
$w_{f,opt}$	(mm)	6,11	6,12	0,14%
$h_{ef,f}$	(m)	8,92	8,84	-0,94%
$S_{ff}$		0,0000	0,0000	-
$S_{ck,w}$		0,0000	0,0000	-
$S_{ck,k}$		0,0000	0,0000	-
$J_{fD}$		0,32879	0,32890	0,03%
$S_f$		-4,138	-4,139	0,03%
<b>FOI</b>		1,6784	1,6790	0,03%
$q_{gSC,f}$	(m <sup>3</sup> /dan)	101 830	101 865	0,03%
$q_{gSC,HDM}$	(m <sup>3</sup> /dan)	60 670		-
<b>Pogreška</b>	(%)	0,00679		-

Usporede li se količine utisnutog materijala u originalno izvedenom frakturiranju, gdje je primjerice utisnuto 11 667 kg podupirača i 31,64 m<sup>3</sup> radnog fluida (tablica 19.) i kod optimalnog dizajna gdje je programirano 5 726 kg podupirača i 16,94 m<sup>3</sup> radnog fluida (tablica 30.), utrošak materijala za frakturiranje je prepolovljen.

Temeljem rezultata proračuna prikazanima u tablici 33. i tablici 39. generirane su i relevantne indikatorske krivulje (IPR) i pravci ukupnog *skin* efekta. Komparativni prikaz istih nalazi se na slici 52.



Slika 52. Indikatorske krivulje i ukupni *skin* faktori frakturiranog ležišta PLQ-F bušotine SJ-2.

Mjerenja proizvodnja frakturirane bušotine iz ožujka 2015. neposredno prije zatvaranja za porast tlaka, za vrijednost dinamičkog tlaka na dubini perforacija od 112,09 bar, iznosila je 60 670 m<sup>3</sup>/dan plina. Rezultati proračuna indikatorske krivulje generirane temeljem hidrodinamskih mjerenja nalaze se u tablici 65. priloga 7.

Potencijalno moguća proizvodnja za prikazani slučaj optimalno dizajnirane frakture aplikacijom tehnike *FP* osjetno je veća i iznosi 98 713 m<sup>3</sup>/dan. Usporede li se opet indikatorske krivulje optimalno dizajnirane frakture koja uključuje efekte proizašle iz primjene metode *FP* i *UFD* procedure koji te efekte isključuje, vidi se da je posebice u području mjerenja taj gubitak vrlo mali i on kod mjenog dinamičkog tlaka smanjuje vrijednost proizvodnje iz 99 180 m<sup>3</sup>/dan na 98 713 m<sup>3</sup>/dan plina. Efekti pješčanog zasipa naročito do vrijednosti proizvodnje od 200 000 m<sup>3</sup>/dan mogu se ovdje smatrati zanemarivim. U ostatku razvoja indikatorskih krivulja ta razlika je s porastom proizvodnje zbog turbulencije plina kroz perforacije i zasip to veća, što se više smanjuje dinamički tlak i povećava odnosna proizvodnja.

Ovakvi rezultati ukazuju na važnost integralnog pristupa provedenog kroz prikazanu metodologiju. Iz ovog primjera može se zaključiti kako je pravilnim dizajnom procesa hidrauličkog frakturiranja moguće s minimalnim odstupanjima približiti se teoretski maksimalnim vrijednostima proizvodnosti ležišta.



#### 4.5. Određivanje proizvodnog potencijala tanko proslojenog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir





Cilj ovog istraživanja je za slučaj buduće razrade ležišta izraditi optimalni program hidrauličkog frakturiranja koji će rezultirati maksimalno mogućim indeksom proizvodnosti. Svrha provedenog istraživanja je utvrditi najveći mogući dobitak u proizvodnosti prema novoj metodologiji. Provedena je i komparativna analiza proizvodnog potencijala ležišta određenog konvencionalnim UFD pristupom i proizvodnog potencijala proizašlog iz primjene nove metode.

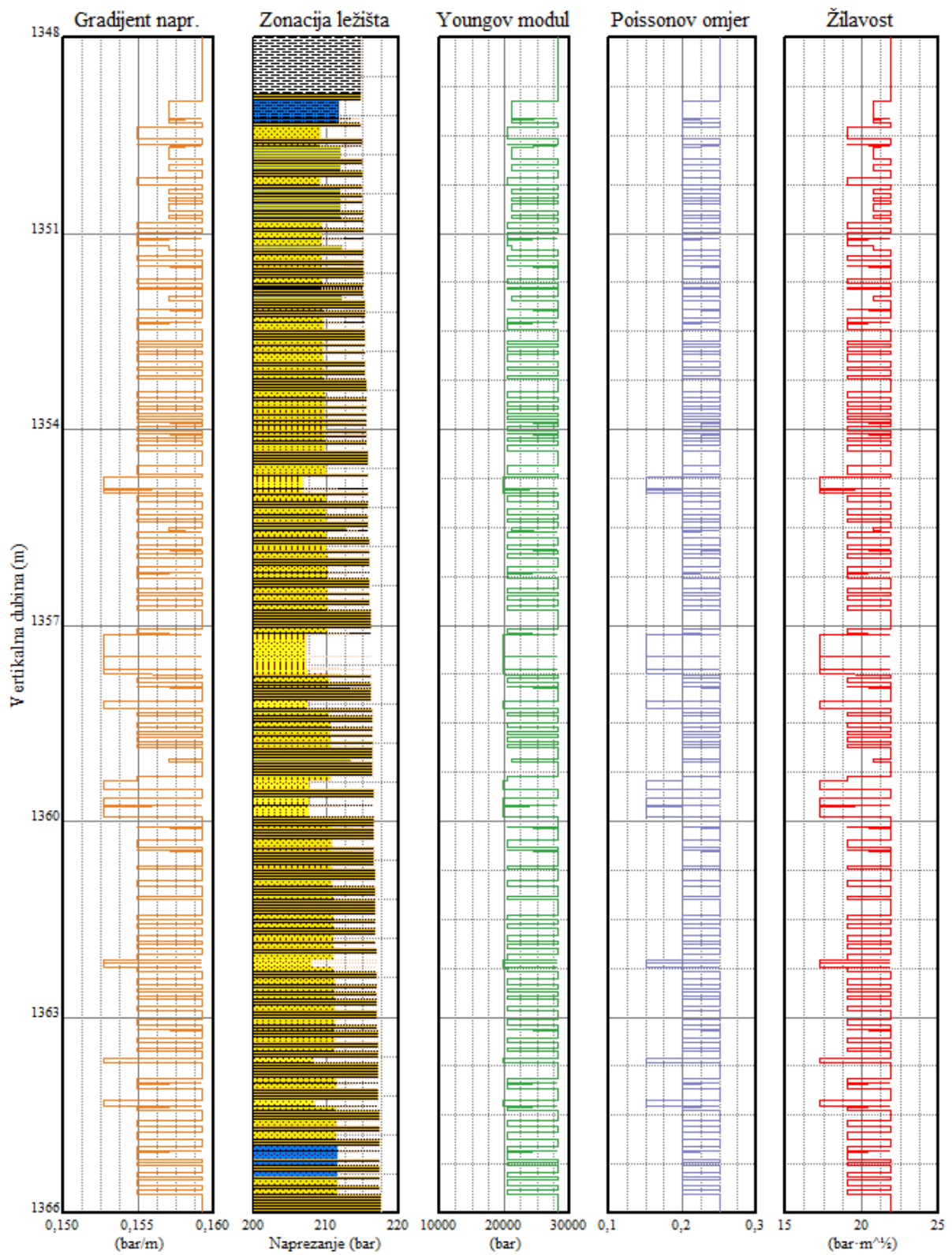
Povijest dosadašnjih radova u bušotini te rezultati provedene petrofizikalne i proizvodne karakterizacije ležišta prikazani su u poglavljima 4.4.1, 4.4.2 i 4.4.3.

##### 4.5.1. Geomehanička i filtracijska karakterizacija ležišta

Korigirane vrijednosti geomehaničkih svojstava i ukupnih koeficijenta filtracije ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir iz poglavlja 4.4.4 aplicirane su na zone/proslojke ležišta PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir iz relevantne TLA analize. Na temelju ovih podataka izrađen je 3D model hidrauličkog frakturiranja. Sažeti pregled geomehaničkih svojstva, srednjih efektivnih koeficijenta filtracije dan je u tablici 42. Parametri korekcije propusnosti za pojedine litologije prikazani su u prilogu 8. u tablici 70., dok se detaljna zonacija s pripadajućim parametrima koji ulaze u model hidrauličkog frakturiranja može naći u tablici 72. Odnosni grafički prikaz geomehaničkih svojstva dan je na slici 53.

Tablica 42. Mehanička svojstva i srednji efektivni koeficijenti filtracije u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir.

Litologija		Gradijent naprezanja	Youngov modul elastičnosti	Poissonov omjer	Žilavost	Srednji efektivni koeficijent filtracije
NAZIV	SIMBOL	bar/m	bar		bar·m <sup>1/2</sup>	m/min <sup>1/2</sup>
ŠEJL		0,1593	28269	0,25	21,922	0,00003
SILT		0,1571	21201	0,20	20,768	0,00022
PRLJAVI PIJESAK		0,1549	20498	0,20	19,043	0,00067
PIJESAK		0,1526	19788	0,15	17,307	0,00183
Srednja vrijednost pijesaka:						0,00106



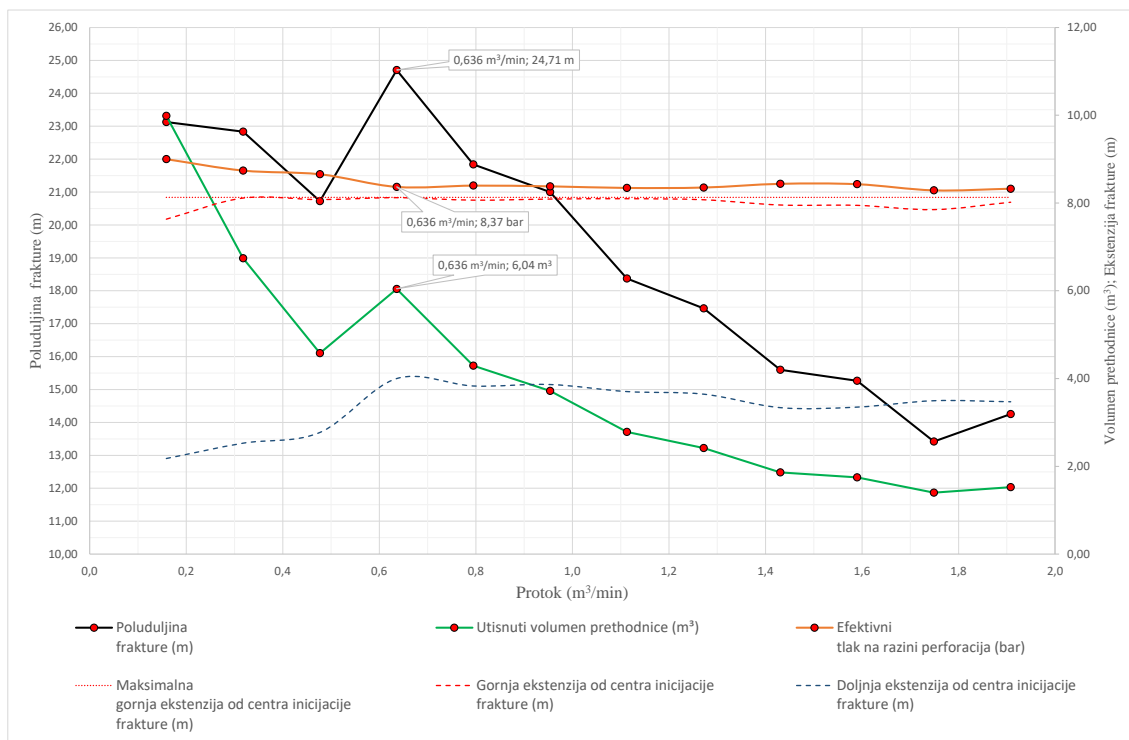
Slika 53. Mehanička svojstva u području ležišta PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir temeljena na TLA analizi.

#### 4.5.2. Izrada karte ravnotežnih odnosa geometrije frakture

Slika 67. iz priloga 9. prikazuje kartu ravnotežnih visina i poluduljina frakture u funkciji veličine protoka prethodnice. Ekstrapolirana pojedinačna rješenja simulacije za maksimalne poluduljine frakture prikazana su u tablici 43., dok je dijagram ravnotežnih odnosa prikazan na slici 54.

Tablica 43. Ekstrapolirana pojedinačna rješenja simulacije iz dijagrama ravnotežnih odnosa za točke maksimalne poluduljine frakture u ležištu PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir.

Protok	Vrijeme utiskivanja	Utisnuti volumen prethodnice	Efektivni tlak na razini perforacija	Tlak u bušotini	Poluduljina frakture	Srednja širina frakture	Gornja ekstenzija od centra inicijacije frakture	Dubina vrha frakture	Doljna ekstenzija od centra inicijacije frakture	Dubina dna frakture
(m <sup>3</sup> /min)	(min)	(m <sup>3</sup> )	(bar)	(bar)	(m)	(mm)	(m)	(m)	(m)	(m)
0,159	62,80	9,98	9,00	219,59	23,13	3,2	7,63	1350,00	2,18	1359,80
0,318	21,20	6,74	8,74	219,37	22,84	3,3	8,11	1349,51	2,53	1360,15
0,477	9,60	4,58	8,65	219,29	20,73	3,4	8,08	1349,55	2,77	1360,40
0,636	9,50	6,04	8,37	219,05	24,71	3,6	8,12	1349,51	4,00	1361,63
0,795	5,40	4,29	8,40	219,07	21,84	3,5	8,07	1349,56	3,83	1361,46
0,954	3,90	3,72	8,38	219,05	21,00	3,5	8,09	1349,54	3,87	1361,49
1,113	2,50	2,78	8,34	219,00	18,37	3,4	8,10	1349,53	3,70	1361,33
1,272	1,90	2,42	8,35	219,01	17,47	3,3	8,07	1349,55	3,65	1361,27
1,431	1,30	1,86	8,44	219,09	15,60	3,2	7,95	1349,67	3,34	1360,97
1,590	1,10	1,75	8,43	219,06	15,27	3,2	7,95	1349,68	3,35	1360,98
1,749	0,80	1,40	8,29	218,91	13,42	3,1	7,85	1349,78	3,50	1361,12
1,908	0,80	1,53	8,33	218,99	14,25	3,1	8,02	1349,61	3,47	1361,10



Slika 54. Dijagram ravnotežnih odnosa maksimalno ostvarenih poluduljina frakture, efektivnog tlaka i volumena prethodnice u funkciji veličine protoka prethodnice za ležište PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir.

Simulacija je provedena u 3D modelu za volumen prethodnice od  $10 \text{ m}^3$  i u rasponu protoka od  $0,159 \text{ m}^3/\text{min}$  (1 bbl/min) pa do maksimalno ostvarivih  $1,908 \text{ m}^3/\text{min}$  (12 bbl/min). Granične vrijednosti rasta frakture postavljene su u krovinskom dijelu na 1349,50 m vertikalne dubine. U podinskom dijelu ta je granica postavljena na dubini 1364,99 m. Dijagram ravnotežnih odnosa prikazan je na slici 54. Globalno maksimalna poluduljina frakture postiže se kod  $0,636 \text{ m}^3/\text{min}$  (4 bbl/min) i utisnutog volumena prethodnice u iznosu od  $6,04 \text{ m}^3$ . Efektivni tlak na razini perforacija pri tome iznosi 8,37 bar, a ostvarena hidraulička poluduljina frakture je 24,71 m.

#### 4.5.3. Modeliranje teoretski optimalne geometrije frakture

Ulazni podaci za proračun prikazani su u tablici 44. Rezultati proračuna teoretski optimalne geometrije frakture za svaki razmatrani protok prethodnice prikazani su tablicom 45.

Tablica 44. Ulazni podaci za proračun maksimalnog indeksa proizvodnosti i teoretski optimalne geometrije frakture po *UFD* proceduri na ležištu PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir.

<b>pVT</b>			
Srednji ležišni tlak	$p_R$	bar	145,87
Ležišna temperatura	$t_R$	°C	30,00
Relativna gustoća plina	$\xi_g$		0,5571
Odnos kondenzata i plina	CGR	$m^3/m^3$	0,00
Gustoća kondenzata	$r_c$	$kg/m^3$	750,00
Odnos vode i plina	WGR	$m^3/m^3$	0,00
Relativna gustoća vode	$\gamma_w$		1,03
Molni udio $H_2S$		%	0,00
Molni udio $CO_2$		%	0,07
Molni udio $N_2$		%	0,43
Korelacija za viskozitet (0 - Lee at al.; 1 - Carr at al.)		Carr at al.	1
<b>Ležište X (iz HDM - odnosi se samo na perforirani interval)</b>			
Moćnost ležišta u području perforiranog intervala	$(k_g h_{ef})_{WT}$	mD m	22,06
Efektivna propusnost za plin perforiranog intervala	$k_{g,WT}$	mD	7,23
Efektivna debljina ležišta perforiranog intervala iz TLA analize	$(h_{ef})_{WT}$	m	3,05
Drenažni radius bušotine	$r_e$	m	300
Polumjer bušotine	$r_w$	m	0,10795
Visina perforacija (mjerene duljine)	$h_p$	m	8,00
Perforirani interval		m	1626 - 1634
Ukupni skin efekt	$s_t$		-0,92
<b>Fraktura</b>			
Interval frakture (vertikalne duljine)		m	1352,3 - 1360,47
Procijenjena visina frakture (vertikalna debljina ležišta)	$h_f$	m	8,17
Vertikalna dubina sredine perforacija	TVD	m	1357,32
Fraktorni gradijent ležišta	$G_f$	bar/10 m	1,61
Moćnost ležišta za plin po visini frakture	$k_g h_{ef}$	mD m	24,34
Efektivna (propusna) debljina ležišta po visini frakture	$h_{ef}$	m	8,17
Efektivna propusnost samo propusnog dijela ležišta po visini frakture	$k_g$	mD	2,97969
Porozitet podupirača	$\Phi_{prop}$	%	30%
Gustoća podupirača	$\rho_{prop}$	$kg/m^3$	2700
Očekivana koncentracija podupirača po visini pukotine	$m_{prop}$	$kg/m'$	361
Procijenjeni gubitak permeabiliteta radi oštećenje rad. fluidom		%	10
Pretpostavljeni dinamički tlak tijekom proizvodnje,	$p_{wf}$	bar	99,70
<b>Skin uslijed oštećenja lica frakture, <math>S_{ff}</math></b>			
Širina oštećenja	$w_s$	m	0,30
Efektivna propusnost oštećene zone frakture (za efektivnu debljinu)	$k_{s,f}$	mD	1,49
<b>Skin uslijed prigušenja frakture, <math>S_{ck}</math></b>			
Širina suženja frakture	$w_{ck}$	m	0,00386
Duljina oštećenja frakture	$x_{f,ck}$	m	0,30
Efektivna propusnost oštećenja frakture - pribušotinska zona	$k_{f,ck}$	mD	15242

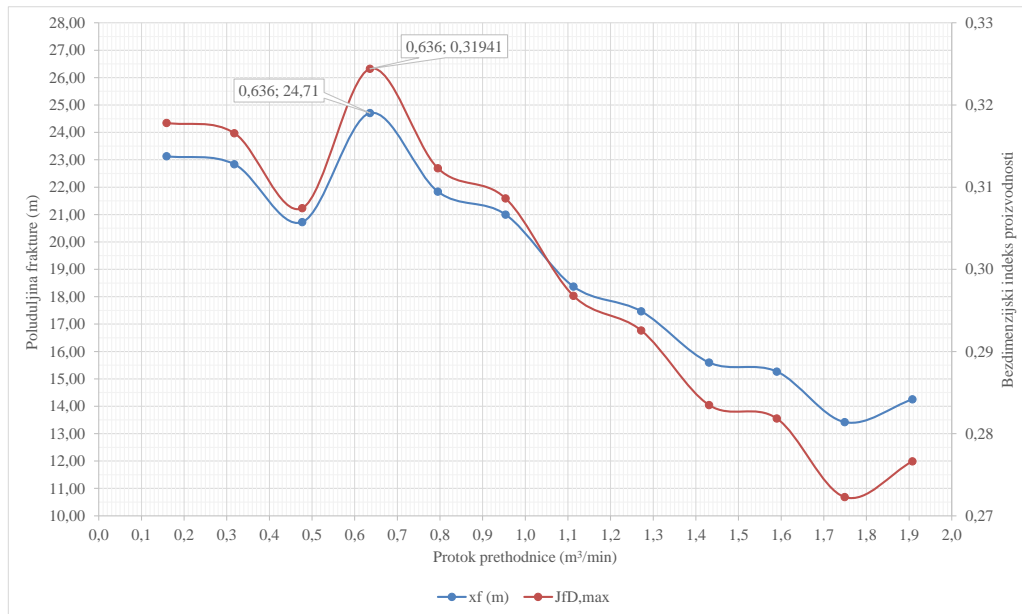
Proračun je proveden iterativnim postupkom mijenjajući masu utisnutog podupirača (broja podupirača) po punoj visini ležišta od 8,17 m i efektivne propusnosti za plin 2,98 mD do postizanja maksimalne poluduljine frakture za svaki razmatrani protok prethodnice. Pri proračunu indeksa proizvodnosti uračunato je dodatno oštećenje frakture sukladno pretpostavkama iz poglavlja 4.3.4. Ovi efekti utječu na maksimalni indeks proizvodnosti te su u proračunu kompenzirani adekvatnom geometrijom frakture. Naposljetku je izračunata vrijednost ekvivalentnog ukupnog *skina* i dobitka na proizvodnosti u odnosu na mjerenu iz ožujka 2015.

Tablica 45. Rezultati proračuna teoretski optimalne geometrije frakture za svaki razmatrani protok prethodnice za ležište PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir.

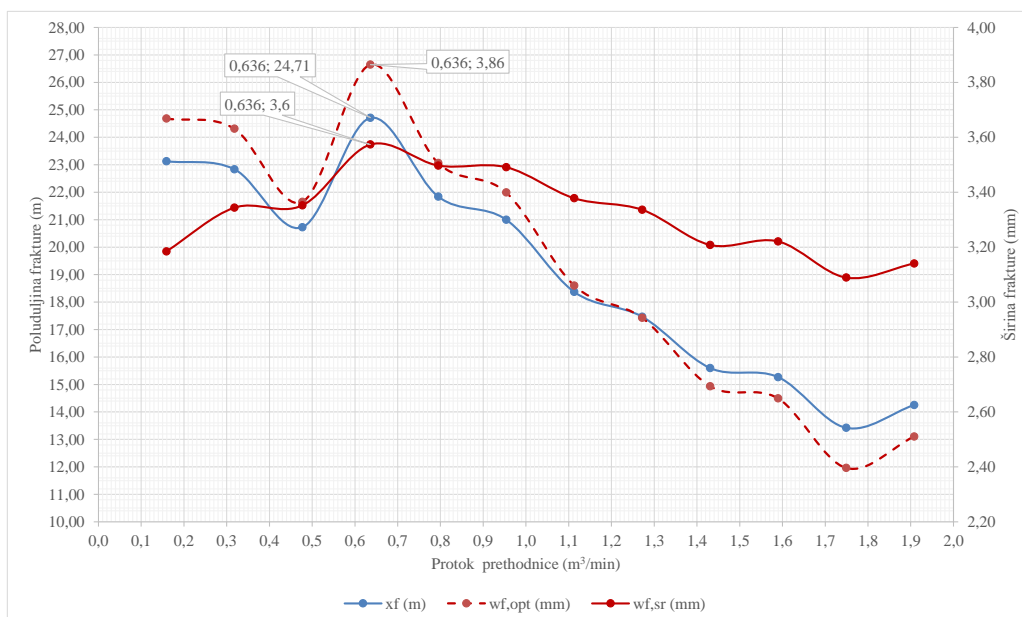
3D simulator	$Q_{pret}$	(bbl/min)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	$Q_{pret}$	(m <sup>3</sup> /min)	0,159	0,318	0,477	0,636	0,795	0,954	1,113	1,272	1,431	1,590	1,749	1,908
	$V_{pret}$	(m <sup>3</sup> )	9,98	6,74	4,58	6,04	4,29	3,72	2,78	2,42	1,86	1,75	1,40	1,53
	$t_{pret}$	(min)	62,80	21,20	9,60	9,50	5,40	3,90	2,50	1,90	1,30	1,10	0,80	0,80
	$x_f$	(m)	23,13	22,84	20,73	24,71	21,84	21,00	18,37	17,47	15,60	15,27	13,42	14,25
	$w_{f, sr}$	(mm)	3,2	3,3	3,4	3,6	3,5	3,5	3,4	3,3	3,2	3,2	3,1	3,1
	$V_f$	(m <sup>3</sup> )	1,19	1,33	1,23	1,75	1,48	1,43	1,19	1,10	0,91	0,89	0,75	0,83
	UFD model	$m_{prop, ef}$	(kg)	2 621	2 561	2 154	2 949	2 365	2 204	1 736	1 587	1 297	1 249	993
$V_{f, ef}$		(m <sup>3</sup> )	1,387	1,355	1,140	1,561	1,251	1,166	0,919	0,840	0,686	0,661	0,525	0,584
$k_{f, ef}$		(mD)	30 065	29 984	29 374	30 484	29 702	29 454	28 618	28 305	27 609	27 480	26 698	27 060
$N_{prop}$			0,01211	0,01181	0,00973	0,01382	0,01080	0,00998	0,00764	0,00691	0,00551	0,00528	0,00408	0,00460
$C_{fD, opt}$			1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
$J_{fD, max}$			0,31283	0,31157	0,30245	0,31941	0,30731	0,30363	0,29178	0,28756	0,27848	0,27684	0,26728	0,27164
$FOI_{max}$			1,96	1,95	1,89	2,00	1,92	1,90	1,83	1,80	1,74	1,73	1,67	1,70
$x_{f, opt}$		(m)	23,13	22,84	20,73	24,71	21,84	21,00	18,37	17,47	15,60	15,27	13,42	14,25
$w_{f, opt}$		(mm)	3,67	3,63	3,36	3,86	3,51	3,40	3,06	2,94	2,69	2,65	2,40	2,51
$S_{ff}$			0,0204	0,0206	0,0227	0,0191	0,0216	0,0224	0,0257	0,0270	0,0302	0,0309	0,0351	0,0331
$S_{ck, w}$			0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$S_{ck, k}$			0,0407	0,0413	0,0455	0,0381	0,0431	0,0449	0,0513	0,0540	0,0604	0,0617	0,0702	0,0661
$J_{fD}$			0,30696	0,30568	0,29634	0,31368	0,30131	0,29755	0,28537	0,28102	0,27163	0,26992	0,25996	0,26451
$S_f$			-3,92	-3,91	-3,81	-3,99	-3,86	-3,82	-3,68	-3,62	-3,50	-3,48	-3,33	-3,40
$FOI$			1,92	1,91	1,86	1,96	1,89	1,86	1,79	1,76	1,70	1,69	1,63	1,66
$q_{gsc, f}$		(m <sup>3</sup> /dan)	171 947	171 229	165 999	175 714	168 785	166 674	159 853	157 417	152 156	151 202	145 621	148 169
$q_{gsc, HDM}$		(m <sup>3</sup> /dan)	81 089	81 089	81 089	81 089	81 089	81 089	81 089	81 089	81 089	81 089	81 089	81 089
<b>Pogr.</b>	(%)	0,00029	0,00004	0,00074	0,00143	0,00053	0,00015	0,00055	0,01243	0,00177	0,00057	0,00052	0,00241	

Zavisnost kretanja izračunatih vrijednosti maksimalnih poluduljina frakture i odnosnih teoretski maksimalnih bezdimenzijskih indeksa proizvodnosti u funkciji protoka prethodnice prikazana je na slici 55. Globalni maksimum poluduljine frakture i maksimalnih bezdimenzijskih indeksa proizvodnosti događa se kod vrijednosti protoka 0,636 m<sup>3</sup>/min (4 bbl/min). Slika 56. daje komparativni prikaz kretanja vrijednosti srednje širine frakture iz simulacije utiskivanja prethodnice i teoretski optimalne. Očitavanjem vrijednosti rezultata proračuna iz tablice 45. maksimalna teoretska vrijednost bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti u iznosu 0,31941 postiže se kod podupiračem ispunjene frakture poluduljine 24,71 m, optimalne širine 3,86 mm i u propusnoj visini ležišta 8,17 m. Efektivna propusnost

podupirača/frakture zbog efekta turbulencije plina procijenjena je na 30 484 mD što u konačnici uz srednju propusnost ležišta od 2,98 mD daje optimalnu bezdimenzijsku provodljivost frakture 1,6. Dobitak na proizvodnosti ovakvog dizajna u odnosu na izvedeno stanje iznosi 2,00. Rezultati kompletnog proračuna provedenog prema *UFD* proceduri nalaze se u tablice 58. priloga 3.



Slika 55. Zavisnost kretanja vrijednosti maksimalnih poluduljina frakture i odnosnih teoretski maksimalnih bezdimenzijskih indeksa proizvodnosti u funkciji protoka prethodnice za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.



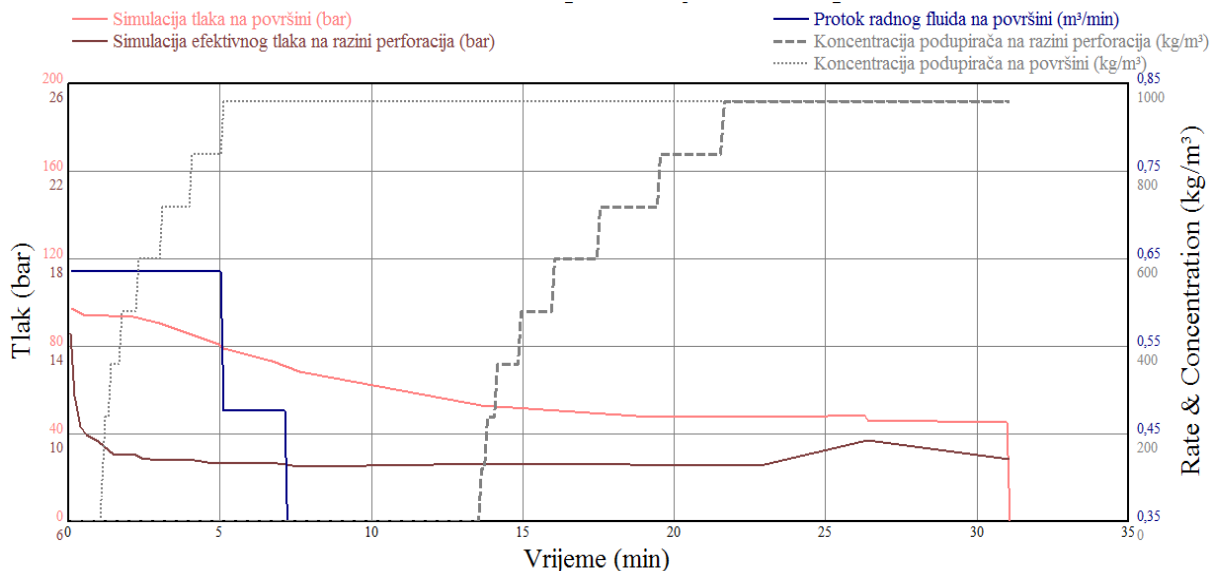
Slika 56. Maksimalne poluduljine frakture, vrijednosti srednje širine iz simulacije utiskivanja prethodnice i teoretski optimalne širine frakture iz *UFD* proračuna za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

#### 4.5.4. Izrada optimalnog programa izvođenja hidrauličkog frakturiranja

Optimalni dizajn podrazumijeva izradu programa frakturiranja s ciljem zapunjenja frakture podupiračem optimalne poluduljine 24,71 m i optimalne srednje širine 3,86 mm u granicama maksimalnog rasta u krovinskom dijelu na 1302,8 m, odnosno u podinskom dijelu do 1317,9 m vertikalne dubine. Pri tome bezdimenzijska provodljivost frakture treba iznositi 1,6. Optimalni program izvođenja hidrauličkog frakturiranja prikazan je u tablici 46. dok se grafički prikaz programa nalazi na slici 57.

Tablica 46. Programa izvođenja optimalne frakture za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

Redni broj ili naziv koraka	Protok radnog fluida na površini	Protok kaše na razini perforacija	Volumen radnog fluida	Volumen kaše	Ukupni volumen kaše	Ukupno vrijeme	Radni fluid	Podupirač	Koncentracija podupirača od:	Koncentracija podupirača do:	Masa podupirača u koraku	
	(m <sup>3</sup> /min)	(m <sup>3</sup> /min)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(min)			(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(kg)
Bušotina	0,636	0,486	5,60	5,60	5,60	11,52	24 mPas	0	0	0	0	
1	0,636	0,318	0,67	0,67	6,27	13,63	24 mPas	0	0	0	0	
2	0,636	0,318	0,05	0,05	6,32	13,79	24 mPas	30/50	119,83	119,83	6	
3	0,636	0,318	0,10	0,11	6,43	14,13	24 mPas	30/50	239,65	239,65	24	
4	0,636	0,318	0,20	0,23	6,65	14,85	24 mPas	30/50	359,48	359,48	72	
5	0,636	0,318	0,30	0,35	7,01	15,96	24 mPas	30/50	479,31	479,31	144	
6	0,636	0,318	0,40	0,49	7,50	17,50	24 mPas	30/50	599,13	599,13	240	
7	0,636	0,318	0,50	0,63	8,13	19,49	24 mPas	30/50	718,96	718,96	359	
8	0,477	0,318	0,50	0,66	8,78	21,55	24 mPas	30/50	838,79	838,79	419	
9	0,318	0,318	0,75	1,02	9,80	24,74	24 mPas	30/50	958,61	958,61	719	
10	0,159	0,198	0,93	1,25	11,05	31,09			958,61	958,61	887	
			Ukupno:	9,99	11,05						Ukupno:	2870



Slika 57. Grafički prikaz programa izvođenja optimalne frakture i simulacija ponašanja tlaka na površini i efektivnog tlaka na razini perforacija za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

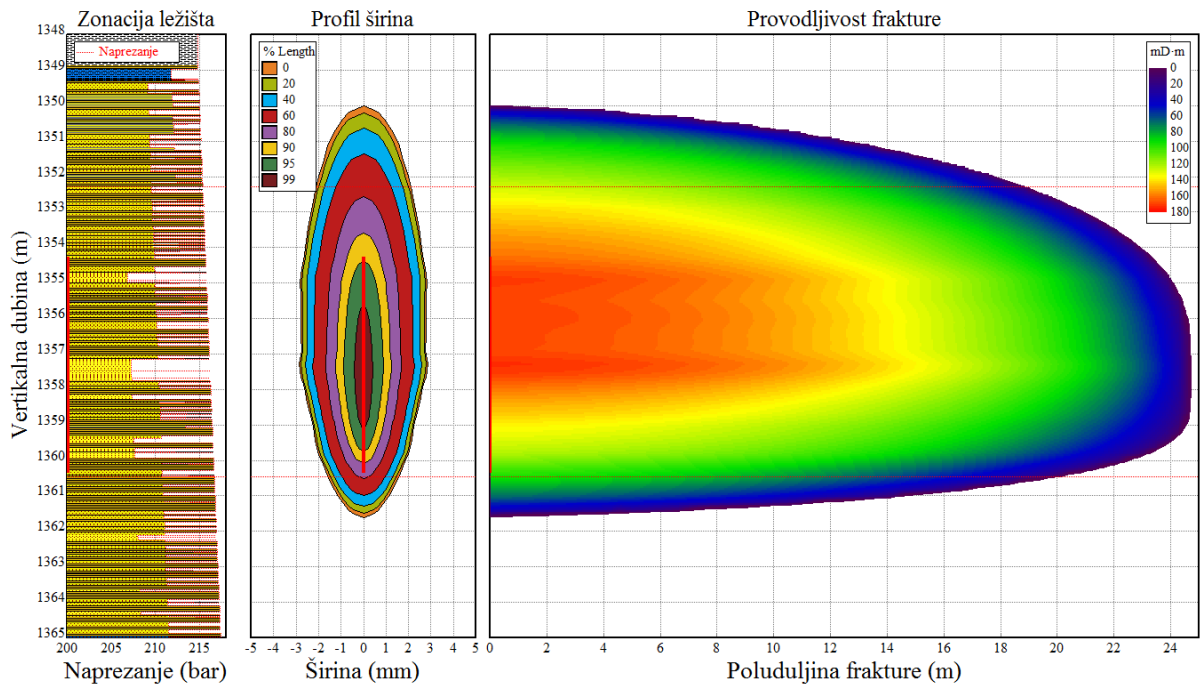


Kao radni fluid korištena je vodena otopina viskozno-elastične površinsko aktivne tvari (engl. *VES*) viskoznosti 24 mPa s. Za podupirač frakture korišten je sintetizirani pijesak srednje veličine promjera zrna 445  $\mu\text{m}$  (engl. *30-50 US Mesh Size Range*) koji je ujedno i filtracijski medij pješčanog zasipa. Projektiran je stepeničast rast koncentracije podupirača u suspenziji do maksimalno 958,61 kg dodanog podupirača na 1  $\text{m}^3$  radnog fluida (8 PPA) te ostvarenim protocima od početnih 0,636  $\text{m}^3/\text{min}$  (4 bbl/min) u prvoj fazi, te stepeničastim smanjenjem protoka do završno 0,159  $\text{m}^3/\text{min}$  (1 bbl/min) u drugoj fazi programa.

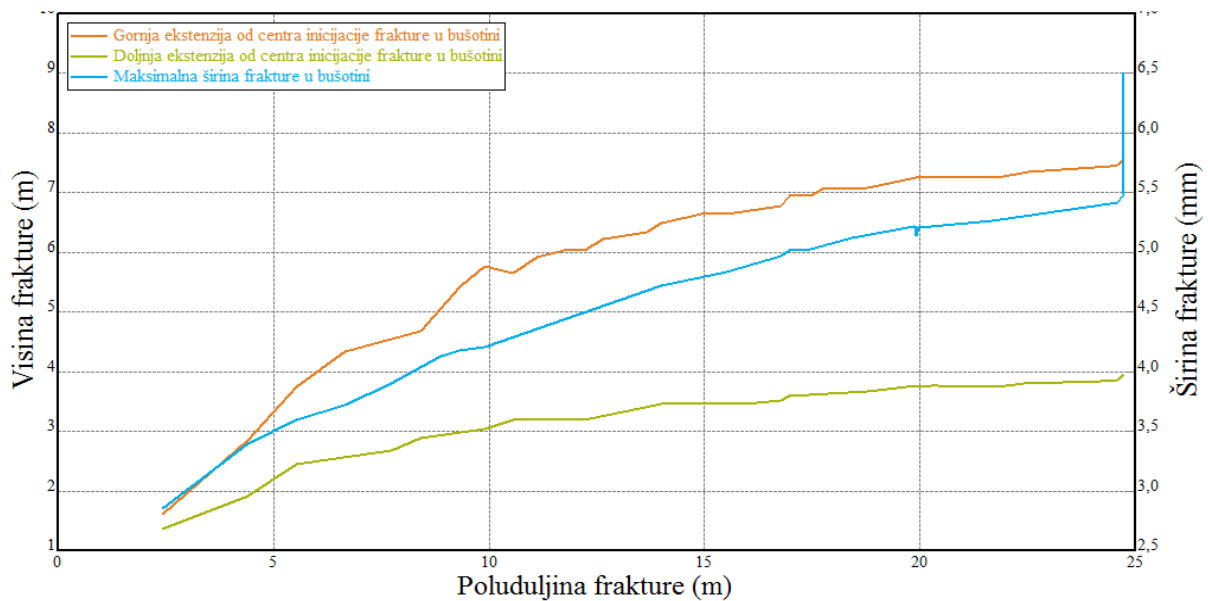
Rezultati simulacije optimalnog programa izvođenja hidrauličkog frakturiranja prikazani su u tablici 47., dok se vizualni prikaz optimalne geometrije i provodljivosti frakture nalazi na slici 58. Slika 59. sadrži grafički prikaz simulacije rasta visine i širine frakture u funkciji ostvarene poluduljine, a slika 60. profil srednje provodljivosti optimalno dizajnirane frakture u funkciji njene poluduljine.

Tablica 47. Rezultati simulacije glavnih parametara optimalno dizajnirane frakture za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

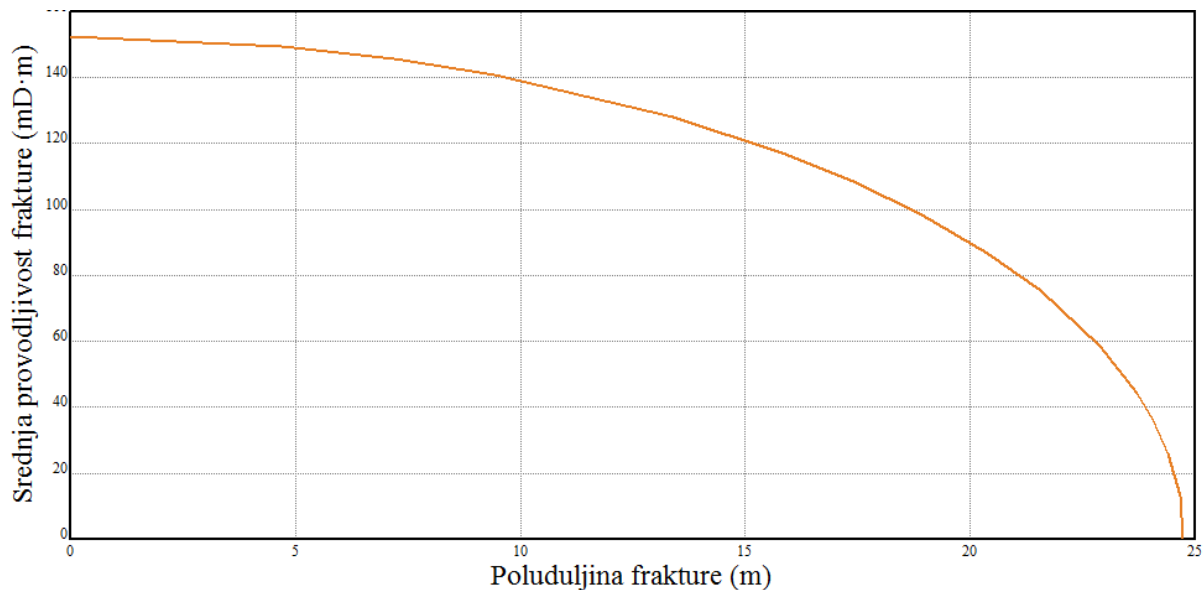
<b>Parametri optimalno dizajnirane frakture</b>		
Utisnuti volumen kaše	( $\text{m}^3$ )	11,054
Utisnuti volumen radnog fluida	( $\text{m}^3$ )	9,9909
Volumen radnog fluida utisnut u formaciju	( $\text{m}^3$ )	9,3176
Efikasnost radnog fluida		15,7%
Efektivni tlak na razini perforacija	(bar)	8,85
Hidraulička (kreirana) poluduljina frakture	(m)	24,74
Gornja ekstenzija od centra inicijacije frakture u bušotini	(m)	7,66
Doljnja ekstenzija od centra inicijacije frakture u bušotini	(m)	3,96
Vertikalna dubina vrha frakture u bušotini	(m)	1350,00
Vertikalna dubina dna frakture u bušotini	(m)	1361,60
Ukupna visina frakture u bušotini	(m)	11,62
Maksimalna hidraulička širina frakture u bušotini	(mm)	5,78
Srednja hidraulička širina frakture u bušotini	(mm)	3,68
Poluduljina frakture ispunjena podupiračem	(m)	24,74
Srednja visina frakture ispunjena podupiračem	(m)	9,54
Srednja visina frakture u ležištu PLQ - F ispunjena podupiračem	(m)	7,86
Srednja širina frakture ispunjena podupiračem	(mm)	5,00
Srednja širina frakture u ležištu PLQ - F ispunjena podupiračem	(mm)	3,87
Srednja koncentracija podupirača u frakturi	( $\text{kg}/\text{m}^2$ )	6,08
Srednja koncentracija podupirača u ležištu PLQ - F	( $\text{kg}/\text{m}^2$ )	6,54
Provodljivost frakture u ležištu PLQ - F	( $\text{mD}\cdot\text{m}$ )	117,95
Bezdimenzijska provodljivost u frakture ležištu PLQ - F		1,600
Srednja propusnost frakture za plin	(mD)	30484
Vrijeme zaustavljanja rasta frakture (engl. <i>Tip Screen Out Time</i> )	(min)	20,99



Slika 58. Profil širine i provodljivosti optimalno dizajnirane frakture u funkciji poluduljine za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.



Slika 59. Dijagram rasta visina i širina u funkciji ostvarene poluduljine frakture za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.



Slika 60. Profil srednje provodljivosti optimalno dizajnirane frakture u funkciji poluduljine frakture za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

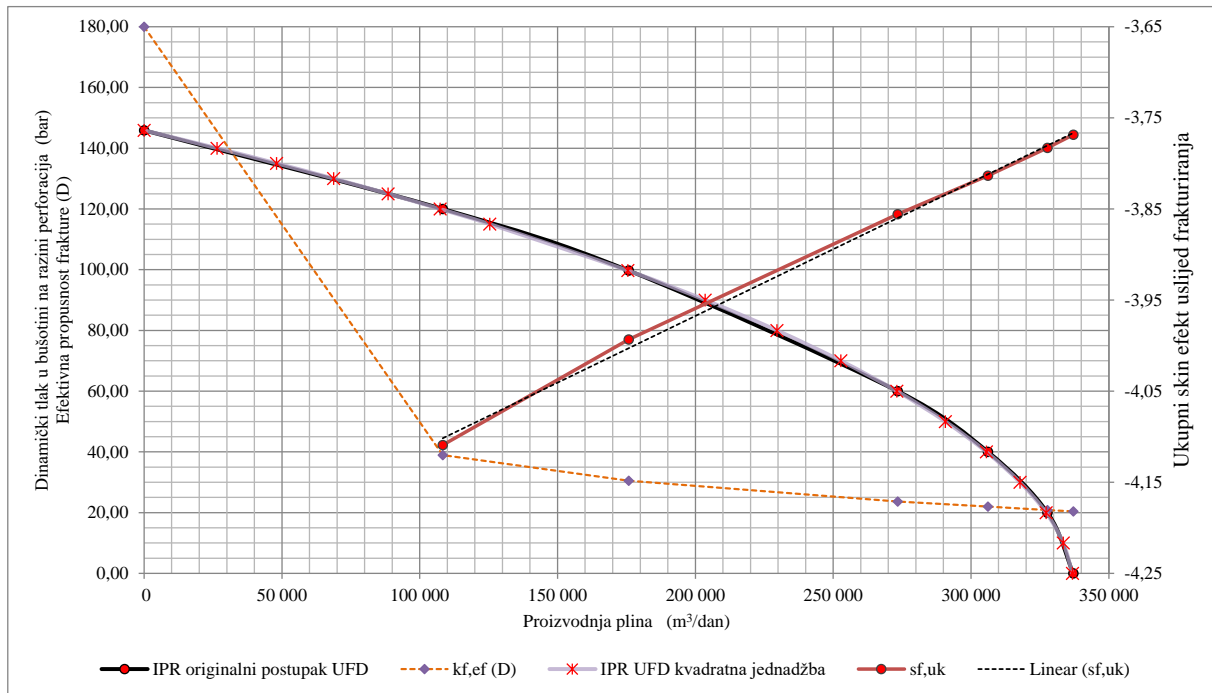
#### 4.5.5. Izrada *FP* proizvodnog modela

Proizvodni model ležišta PLQ-F opremljenog tehnikom *FP* izrađen je za konstantne vrijednosti optimalne poluduljine frakture  $x_{f,opt} = 24,74\text{ m}$ , optimalne širine frakture  $w_{opt} = 3,87\text{ mm}$  i srednje visine frakture  $h_{ef,f} = 7,86\text{ m}$ . Ulazni podaci proračuna prikazani su u tablici 44., a rezultati *UFD* proračuna u tablici 60. priloga 3. Vrijednosti pojedinih komponenti *skina*, ekvivalentnog linearnog *skina* uslijed frakturiranja  $s_{UFD,opt}$  i vrijednosti efekta visokih brzina protjecanja plina u frakturi  $D_{UFD,opt}$  izračunate su na način kako je opisano u poglavlju 3.1.10. Linearna regresija provedena je za vrijednosti protoka plina u ograničenom rasponu proizvodnje od 175 793 m<sup>3</sup>/dan do maksimalne vrijednosti 337 097 m<sup>3</sup>/dan. Tablica 48. i slika 61. prikazuju rezultate tih proračuna.

Tablica 48. Zavisnost tlakova u bušotini i proizvodnje plina te vrijednosti komponenti *skina* kao posljedice frakturiranja optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir prema *UFD* proceduri.

$p_{wf}$ (bar)	$q_{gSC,f}$ (m <sup>3</sup> /dan)	$s_{fuk}$	$s_f$	$D_f q_{gSC}$	$k_{fef}$ (mD)
145,87	0	-4,24	-4,24	0,000000	180 000
120,00	108 320	-4,11	-4,24	0,127498	38 929
99,70	175 793	-3,99	-4,24	0,243392	30 494
60,00	273 392	-3,86	-4,24	0,380965	23 618
40,00	306 154	-3,81	-4,24	0,423222	21 959
20,00	327 736	-3,78	-4,24	0,453884	20 858
0,00	337 097	-3,77	-4,24	0,468143	20 373

Rezultati proračuna proizvodnosti optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F prikazani su u tablici 49. Ispravnost postupka potvrđena je, kako se vidi na slici 61., gotovo potpunim preklapanjem indikatorskih krivulja, one dobivene originalnim *UFD* iterativnim postupkom i krivulje dobivene generiranom iz  $s_{UFD,Opt.}$  i  $D_{UFD,Opt.}$ . Tu su također prikazane krivulje ovisnosti efektivne propusnosti frakture  $k_{f,ef}$  o protoku plina te linearne regresije i ovisnosti ukupnog *skina* uslijed frakturiranja  $s_{f,uk}$  o veličini protoka plina.



Slika 61. Indikatorska krivulja optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir i pravac linearne regresije ovisnosti ukupnog *skina* uslijed frakturiranja o veličini protoka plina.

Jednadžba pravca kao rezultat provedene linearne regresije ima sljedeći oblik:

$$s_{UFD,Opt.,t} = s_{UFD,Opt.} + D_{UFD,Opt.} \cdot q_{gSC,UFD,Opt.} = -4,24 + 1,3869 \times 10^{-6} \left( \frac{m^3}{dan} \right)^{-1} \times q_{gSC,FP,Opt.} \left( \frac{m^3}{dan} \right).$$

Ovdje prikazane vrijednosti odnose se isključivo na frakturu i ne uvažavaju kombinirane efekte zacijevljene bušotine: raskrivanja, perforacija i pješčanog zasipa.

Tablica 49. Rezultati proračuna proizvodnosti optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir temeljem *UFD* postupka.

$P_{wf}$	$\bar{\mu}_g$	$\bar{Z}$	$s_{UFD,Opt.}$	$D_{UFD,Opt.}$	$s_{UFD,Opt.}$	$a_{UFD,Opt.}$	$b_{UFD,Opt.}$	$q_{gSC,UFD,Opt.}$	$J_{D,UFD,Opt.}$	$FOI_{UFD,Opt.}$
(bar)	(mPa s)			(m <sup>3</sup> /dan) <sup>-1</sup>		(Pa <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> /s) <sup>-1</sup> )	(Pa <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> /s) <sup>-2</sup> )	(m <sup>3</sup> /dan)		
0,00	0,012882	0,879841	-4,24	1,3869E-06	-3,77	4,7110E+13	1,9180E+12	336 792	0,293237	1,84
10,00	0,013066	0,873246	-4,24	1,3869E-06	-3,77	4,7425E+13	1,9308E+12	333 439	0,293638	1,84
20,00	0,013253	0,866935	-4,24	1,3869E-06	-3,78	4,7756E+13	1,9443E+12	327 261	0,294378	1,84
30,00	0,013466	0,860952	-4,24	1,3869E-06	-3,80	4,8191E+13	1,9621E+12	317 767	0,295524	1,85
40,00	0,013680	0,855303	-4,24	1,3869E-06	-3,81	4,8635E+13	1,9801E+12	305 579	0,297008	1,86
50,00	0,013893	0,850016	-4,24	1,3869E-06	-3,83	4,9087E+13	1,9985E+12	290 700	0,298839	1,87
60,00	0,014107	0,845075	-4,24	1,3869E-06	-3,86	4,9553E+13	2,0175E+12	273 091	0,301036	1,88
70,00	0,014320	0,840526	-4,24	1,3869E-06	-3,89	5,0031E+13	2,0370E+12	252 735	0,303616	1,90
80,00	0,014534	0,836370	-4,24	1,3869E-06	-3,92	5,0526E+13	2,0571E+12	229 580	0,306606	1,92
90,00	0,014747	0,832624	-4,24	1,3869E-06	-3,95	5,1037E+13	2,0779E+12	203 564	0,310036	1,94
99,70	0,014954	0,829369	-4,24	1,3869E-06	-3,99	5,1552E+13	2,0989E+12	175 505	0,313822	1,96
115,00	0,015280	0,825045	-4,24	1,3869E-06	-4,06	5,2402E+13	2,1335E+12	125 372	0,320822	2,01
120,00	0,015387	0,823836	-4,24	1,3869E-06	-4,09	5,2692E+13	2,1453E+12	107 350	0,323415	2,02
125,00	0,015494	0,822737	-4,24	1,3869E-06	-4,11	5,2987E+13	2,1573E+12	88 489	0,326175	2,04
130,00	0,015601	0,821742	-4,24	1,3869E-06	-4,14	5,3287E+13	2,1695E+12	68 758	0,329112	2,06
135,00	0,015729	0,820851	-4,24	1,3869E-06	-4,17	5,3667E+13	2,1850E+12	48 063	0,332251	2,08
140,00	0,015860	0,820065	-4,24	1,3869E-06	-4,20	5,4060E+13	2,2010E+12	26 488	0,335587	2,10
145,87	0,016014	0,819267	-4,24	1,3869E-06	-4,24	5,4532E+13	2,2202E+12	0	0,339776	2,13

U nastavku su prikazani ulazni podaci i rezultati proračuna linearnih i nelinearnih oštećenja koja se događaju u perforacijama i anularnom pješčanom zasipu.

Tablica 50. Ulazni parametri za proračun oštećenja kao posljedice protjecanja plina u perforacijama optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

Unutarnji promjer proizvodne kolone zaštitnih cijevi	$r_c$	m	0,0797
Visina perforacija	$h_p$	m	8,00
Gustoća perforiranja		perf./m	39,00
Broj perforacija	$n_p$		312,00
Duljina perforacije (promjer dljeta - unutarnji promjer proiz. kolone)	$L_p$	m	0,1362
Promjer perforacija	$D_p$	m	0,0211
Efektivna propusnost za plin podupirača u perforacijama	$k_G$	mD	180000
Faktor turbulencije u perforacijama	$\beta_G$	m <sup>-1</sup>	40530

Tablica 51. Vrijednosti linearnog *skin* efekta uslijed protjecanja u perforacijama i odgovarajućeg efekta visokih brzina protjecanja fluida optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

Linearni skin efekt zbog pješčanog zasipa	$S_G$		0,0011
Koeficijent turbulencije pješčanog zasipa	$D_G$	(m <sup>3</sup> /dan) <sup>-1</sup>	3,9800E-08

Tablica 36. daje pregled ulaznih parametara za proračun oštećenja kao posljedice protjecanja plina u anularnom sustavu pješčanog zasipa.

Tablica 52. Vrijednosti *skin* efekta uslijed linearnog protjecanja u sustavu anularnog pješčanog zasipa i odgovarajućeg efekta visokih brzina protjecanja fluida optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

Linearni skin efekt zbog anularnog pješčanog zasipa	$S_{GP}$		0,0000042
Koeficijent turbulencije anularnog pješčanog zasipa	$D_{GP}$	[m <sup>3</sup> /dan] <sup>-1</sup>	6,0708E-12

Rezultati izračuna ukupnog linearnog *skin* faktora i odgovarajućeg ukupnog efekta visokih brzina protjecanja fluida prikazani su u tablici 53.

Tablica 53. Vrijednosti ukupnog linearnog *skin* faktora i odgovarajućeg ukupnog efekta visokih brzina protjecanja fluida optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir opremljenog metodom *FP*.

Ukupni linearni skin efekt ( $S_f + S_G + S_{CP}$ )	$S_{FP,Opt.}$		-4,23569
Ukupni koeficijent turbulencije ( $D_f + D_G + D_{CP}$ )	$D_{FP,Opt.}$	( $m^3/dan$ ) <sup>-1</sup>	1,42668E-06

Na temelju dobivenih vrijednosti linearnog *skina* uslijed frakturiranja  $s_{FP,Opt.}$  i vrijednosti efekta visokih brzina protjecanja plina u frakturi  $D_{FP,Opt.}$  izrađen je proizvodni model optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F opremljenog tehnikom *FP*. Rezultati proračuna prikazani su u tablici 54.

Tablica 54. Rezultati proračuna proizvodnog modela optimalno frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir opremljenog tehnikom *FP*.

$P_{wf}$ (bar)	$\bar{\mu}_g$ (mPa s)	$\bar{Z}$	$s_{FP,Opt.}$	$D_{FP,Opt.}$ ( $m^3/dan$ ) <sup>-1</sup>	$s_{FP,Opt.,t}$	$a_{FP,Opt.}$ ( $Pa^2 (m^3/s)^{-1}$ )	$b_{FP,Opt.}$ ( $Pa^2 (m^3/s)^{-2}$ )	$q_{gSC,FP,Opt.}$ ( $m^3/dan$ )	$J_{D,FP,Opt.}$	$FOI_{FP,Opt.}$
0,00	0,012882	0,879841	-4,24	1,4267E-06	-3,76	4,7127E+13	1,9731E+12	335 543	0,292150	1,83
10,00	0,013066	0,873246	-4,24	1,4267E-06	-3,76	4,7442E+13	1,9863E+12	332 211	0,292556	1,83
20,00	0,013253	0,866935	-4,24	1,4267E-06	-3,77	4,7773E+13	2,0001E+12	326 071	0,293308	1,84
30,00	0,013466	0,860952	-4,24	1,4267E-06	-3,78	4,8209E+13	2,0184E+12	316 635	0,294471	1,84
40,00	0,013680	0,855303	-4,24	1,4267E-06	-3,80	4,8653E+13	2,0370E+12	304 519	0,295977	1,85
50,00	0,013893	0,850016	-4,24	1,4267E-06	-3,82	4,9105E+13	2,0559E+12	289 726	0,297838	1,86
60,00	0,014107	0,845075	-4,24	1,4267E-06	-3,85	4,9571E+13	2,0754E+12	272 216	0,300071	1,88
70,00	0,014320	0,840526	-4,24	1,4267E-06	-3,88	5,0050E+13	2,0954E+12	251 968	0,302694	1,89
80,00	0,014534	0,836370	-4,24	1,4267E-06	-3,91	5,0544E+13	2,1162E+12	228 928	0,305736	1,91
90,00	0,014747	0,832624	-4,24	1,4267E-06	-3,95	5,1055E+13	2,1376E+12	203 034	0,309229	1,94
99,70	0,014954	0,829369	-4,24	1,4267E-06	-3,99	5,1571E+13	2,1592E+12	175 095	0,313088	1,96
115,00	0,015280	0,825045	-4,24	1,4267E-06	-4,06	5,2421E+13	2,1947E+12	125 142	0,320234	2,00
120,00	0,015387	0,823836	-4,24	1,4267E-06	-4,08	5,2711E+13	2,2069E+12	107 174	0,322884	2,02
125,00	0,015494	0,822737	-4,24	1,4267E-06	-4,11	5,3006E+13	2,2192E+12	88 362	0,325707	2,04
130,00	0,015601	0,821742	-4,24	1,4267E-06	-4,14	5,3306E+13	2,2318E+12	68 675	0,328714	2,06
135,00	0,015729	0,820851	-4,24	1,4267E-06	-4,17	5,3687E+13	2,2477E+12	48 017	0,331930	2,08
140,00	0,015860	0,820065	-4,24	1,4267E-06	-4,20	5,4080E+13	2,2642E+12	26 470	0,335351	2,10
145,87	0,016014	0,819267	-4,24	1,4267E-06	-4,24	5,4552E+13	2,2839E+12	0	0,339653	2,13

#### 4.5.6. Diskusija o rezultatima istraživanja u bušotini SJ – 1 Dir

##### *Optimalni program izvođenja hidrauličkog frakturiranja*

Usporedba ključnih proizvodnih pokazatelja i geometrije frakture prema UFD proračunu i prema optimalno dizajniranom programu hidrauličkog frakturiranja pokazuje kako su vrijednosti odstupanja zanemarive (tablica 55.). Odstupanje bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti je 0,04%, ukupnog *skin* efekta je 0,03%, a dobitaka na proizvodnosti 0,04%. Odstupanje poluduljine frakture je 0,1%, srednje visine frakture -3,81% i optimalne srednje širine frakture 0,12%.

Tablica 55. Usporedba ključnih proizvodnih pokazatelja i geometrije frakture prema *UFD* proračunu i prema optimalno dizajniranom programu hidrauličkog frakturiranja te njihove razlike za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

		<b>UFD model</b>	<b>3D simulator</b>	<b>Razlika</b>
$m_{prop, ef}$	(kg)	2 949	2 843	-3,60%
$V_{prop-2krila}$	(m <sup>3</sup> )	1,561	1,504	-3,60%
$V_R$	(m <sup>3</sup> )	2 310 013	2 310 013	-
$k_{f,ef}$	(mD)	30 484	30 484	-
$k_g$	(mD)	2,980	2,980	0,00%
$N_{prop}$		0,01382	0,01332	-3,60%
$C_{fD,opt}$		1,600	1,600	0,02%
$J_{fD,max}$		0,31941	0,31954	0,04%
$FOI_{max}$		1,9995	2,0003	0,04%
$x_{f,opt}$	(m)	24,71	24,74	0,10%
$w_{f,opt}$	(mm)	3,86	3,87	0,12%
$h_{ef,f}$	(m)	8,17	7,86	-3,81%
$S_{ff}$		0,0191	0,0191	-
$S_{ck,w}$		0,0000	0,0000	-
$S_{ck,k}$		0,0381	0,0381	-
$J_{fD}$		0,31368	0,31381	0,04%
$S_f$		-3,992	-3,993	0,03%
<b>FOI</b>		1,9636	1,9644	0,04%
$q_{gsc,f}$	(m <sup>3</sup> /dan)	175 714	175 784	0,04%
$q_{gsc,HDM}$	(m <sup>3</sup> /dan)	81 089		-
<b>Pogreška</b>	(%)	0,00143		-

*Komparativna analiza proizvodnog potencijala ležišta određenog konvencionalnim UFD pristupom i proizvodnog potencijala proizašlog iz primjene nove metode.*

Komparativna analiza provedena je s ciljem utvrđivanja kvantitativnih razlika u procjeni proizvodnog potencijala ležišta određenog konvencionalnim *UFD* pristupom i proizvodnog potencijala proizašlog iz primjene nove metode. Usporedba ključnih proizvodnih pokazatelja i geometrije frakture te njihove razlike dana je u tablici 56.

Usporedbom prikazanih vrijednosti može se uočiti velika razlika. Razlog leži u načinu kako je određena visina i masa podupirača koja će biti utisnuta u frakturu. Kod određivanja maksimalnog indeksa proizvodnosti konvencionalnim *UFD* pristupom nužno je pretpostaviti visinu frakture i masu podupirača koja će biti utisnuta u propusni dio ležišta. U ovom istraživanju je pretpostavljeno da će fraktura prekriti ležište u punoj visini od 8,17 m. Ova visina frakture ujedno je uzeta kao granična. Efektivna debljina ležišta iznosi 4,03 m. Pretpostavljena je masa podupirača u iznosu od 1000 kg/m vertikalne visine ležišta. Jednom kada je poznata masa podupirača i visina frakture, primjenom konvencionalnog *UFD* postupka, jednoznačno je određena optimalna poluduljina i optimalna širina frakture te maksimalno mogući indeks

produktivnosti. Izračunata optimalna poluduljina frakture u ovom slučaju iznosi 33,18 m, a optimalna širina 7,97 mm. Ova geometrija frakture rezultira maksimalno mogućim indeksom proizvodnosti 0,3474. Tu je dobitak na proizvodnosti 2,17 što je ekvivalent ukupnog *skina* - 4,30. Pretpostavka visine dobra je praksa u slučaju ležišta gdje su krovinske i podinske stijene dovoljne čvrstoće da mogu zadržati frakturu u području tretiranog ležišta. U slučaju tanko proslojenih ležišta rast frakture u duljinu i širinu prati rast u visinu i ne može se smatrati konstantnom. Ukoliko se pogleda dijagram ravnotežnih visina na slici 67 iz priloga 9., jasno je da je nemoguće kreirati frakturu optimalne poluduljine iz konvencionalnog *UFD* postupka a da se ne prijeđe granična visine rasta frakture.

Tablica 56. Usporedba ključnih proizvodnih pokazatelja i geometrije frakture prema konvencionalnom *UFD* proračunu i prema optimalno dizajniranom programu hidrauličkog frakturiranja te njihove razlike za ležište PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

		<b>UFD konvenc.</b>	<b>3D simulator</b>	<b>Razlika</b>
$m_{prop,ef}$	(kg)	8 170	2 843	-65,20%
$k_{f,ef}$	(mD)	40 230	30 484	-24,23%
$N_{prop}$		0,02492	0,01332	-46,52%
$C_{fD,opt}$		1,600	1,600	0,02%
$J_{fD,max}$		0,35259	0,31954	-9,38%
$FOI_{max}$		2,2072	2,0003	-9,38%
$x_{f,opt}$	(m)	33,18	24,74	-25,44%
$w_{f,opt}$	(mm)	7,97	3,87	-51,48%
$h_f$	(m)	8,17	7,86	-3,81%
$S_{ff}$		0,0142	0,0191	34,13%
$S_{ek,w}$		0,0000	0,0000	-
$S_{ek,k}$		0,0284	0,0381	34,13%
$J_D$		0,3474	0,3138	-9,66%
$S_f$		-4,301	-3,993	-7,16%
<b>FOI</b>		2,1745	1,9644	-9,66%
$q_{gSC,f}$	(m <sup>3</sup> /dan)	194 587	175 784	-9,66%
$q_{gSC,HDM}$	(m <sup>3</sup> /dan)	81 089	81 089	-
<b>Pogreška</b>	(%)	0,00102	-	-

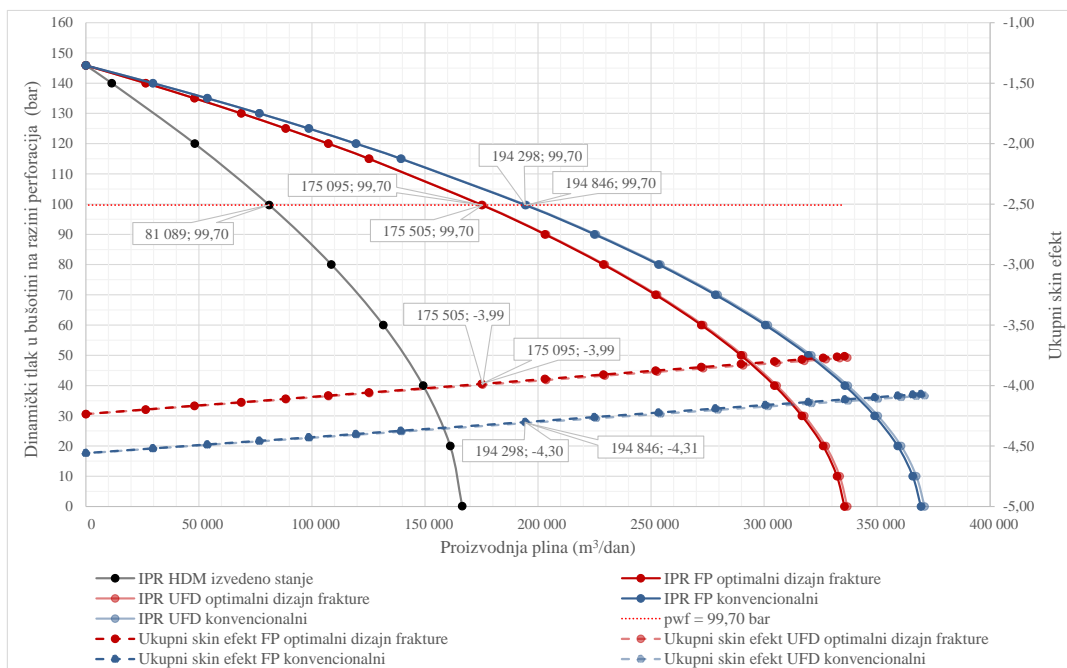
Uvođenjem nove metodologije, postalo je moguće odrediti koja je to maksimalna poluduljina frakture koja neće preći granične vrijednosti visine. Ako se ta poluduljina uzme kao optimalna, tada je uz pomoć *TSO* tehnike frakturiranja moguće kreirati optimalnu širinu frakture koja će rezultirati maksimalno mogućim indeksom proizvodnosti. U tu svrhu izrađen je optimalni program hidrauličkog frakturiranja. Rezultat 3D simulacije hidrauličkog frakturiranja je optimalna poluduljina frakture koja iznosi 24,74 m, optimalna širina 3,87 mm i visina frakture 7,86 m. Ova geometrija omogućuje maksimalno moguću bezdimenzijski indeks proizvodnosti u iznosu 0,3138. Dobitak na proizvodnosti je 1,96 što je ekvivalent ukupnog *skina* -3,99.



Na temelju rezultata proračuna proizvodnih modela prikazanih u tablici 13., tablici 9., tablici 12., tablici 49., i tablici 54. generirane su slijedeće *IPR* krivulje:

- „*IPR* HDM izvedeno stanje“, indikatorska krivulja generirana na temelju hidrodinamskih mjerenja (zacjevljenja bušotina s perforacijama u području ležišta) (tablica 13.);
- „*IPR* FP optimalni dizajn frakture“, indikatorska krivulja optimalno frakturiranog ležišta pomoću tehnike *FP* generirana primjenom nove metodologije (tablica 54.);
- „*IPR* UFD optimalni dizajn frakture“ indikatorska krivulja optimalno frakturiranog ležišta gdje je zanemaren utjecaja perforacija i pješčanog zasipa (tablica 49.);
- „*IPR* FP konvencionalni“, indikatorska krivulja frakturiranog ležišta pomoću tehnike *FP* generirana uz pomoć konvencionalnog *UFD* proračuna (tablica 12.);
- „*IPR* UFD konvencionalni“ indikatorska krivulja frakturiranog ležišta gdje je zanemaren utjecaja perforacija i pješčanog zasipa (tablica 9.);

Komparativni prikaz *IPR* krivulja zajedno s pravcima ukupnog *skin* efekta dan je na slici 62.



Slika 62. Indikatorske krivulje i ukupni *skin* faktori frakturiranog ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

Ovdje je potrebno napomenuti da postoje zanemarive razlike u prikazanim vrijednostima proizvodnje na slici 62. i u tablici 56. Ove razlike uvjetovane su linearnom regresijom ukupnog *skin* efekta provedenom tijekom izrade proizvodnih modela.

Usporedi li se razvoj indikatorskih krivulja *FP* „IPR FP optimalni dizajn frakture“ i „IPR UFD optimalni dizajn frakture“ vidi se gotovo potpuno preklapanje krivulja sve do vrijednosti proizvodnje od 300 000 m<sup>3</sup>/dan. Preklapanje krivulja pokazuje da su efekti perforiranja i pješčanog zasipa na gubitak tlaka u ovom području zanemarivi. U ostatku razvoja indikatorskih krivulja ta je razlika s porastom proizvodnje u toliko veća što se više smanjuje dinamički tlak i povećava proizvodnja. Ovaj gubitak uzrokovan je nešto većim utjecajem turbulencije plina pri visokim protocima. Ova je razlika još uvijek dovoljno mala tako da se i ona se može smatrati zanemarivom. Sličan razvoj prate i indikatorske krivulje „IPR FP konvencionalni“ i „IPR UFD konvencionalni“. Komparirajući razvoj krivulja „IPR FP optimalni dizajn frakture“ i „IPR HDM izvedeno stanje“ dokazana je superiornost primjene tehnike *FP* u odnosu na konvencionalno raskriveno ležište.

Iz provedenog istraživanja zaključuje se da konvencionalni *UFD* pristup određivanja optimalne geometrije frakture može dovesti do nerealnih procjena indeksa proizvodnosti. Primjenom nove metodologije, kod koje je ključni korak izrada dijagrama ravnotežnih odnosa geometrije frakture, moguće je odrediti maksimalnu poluduljinu u odnosu na graničnu visinu frakture. Zadatak je optimalnog programa hidrauličkog frakturiranja da za tu poluduljinu i visinu kreira širinu frakture ispunjene podupiračem koja će u konačnosti dati maksimalno mogući indeks proizvodnosti. Usporedbom ključnih proizvodnih pokazatelja i geometrije frakture prema *UFD* proračunu i prema optimalnom programu hidrauličkog frakturiranja te njihovih razlika potvrđena je opravdanost primjene nove metode.

I ovim istraživanjem dokazana je teza kako je pravilnim dizajnom procesa hidrauličkog frakturiranja moguće, s minimalnim odstupanjima, približiti se teoretski maksimalnim vrijednostima proizvodnosti ležišta.

## 5. ZAKLJUČAK

Za potrebe ovog istraživanja i specifičnosti uvjetovanih tanko proslojenim ležištima razvijena je metodologija koja će funkcionalno povezati proces hidrauličkog frakturiranja i zahtjev za maksimalno mogućim indeksom proizvodnosti. Pri tome se vodilo računa da mora biti univerzalno primjenjiva za procjenu proizvodnog potencijala bilo kojeg tanko proslojenog ležišta na lokalitetu Sjeverni Jadran. Uvođenjem ove metodologije postalo je moguće preciznije valorizirati stvarni proizvodni potencijal tanko proslojenih ležišta. To se postiže interdisciplinarnim spajanjem teorije i prakse korištenjem najnovijih dostignuća u rezoluciji i interpretaciji karotažnih mjerenja i mogućnosti korištenih računalnih programa zadnje generacije.

Metodologija provedenog istraživanja temelji se na pretpostavci da su za facijese sličnog karotažnog odraza, dakle sličnih debljina pješćanih tijela, sličnih udjela glina i silta te efektivnih poroziteta, njihova geomehanička, te filtracijskih i proizvodna svojstva slična ili ista. Metodologija provedenog istraživanja očituje se u provedbi sljedećih koraka:

1. petrofizikalna karakterizacija tanko proslojenog ležišta;
2. proizvodna karakterizacija tanko proslojenog ležišta;
3. geomehanička i filtracijska karakterizacija tanko proslojenog ležišta;
4. izrada dijagrama ravnotežnih odnosa geometrije frakture u tanko proslojenom ležištu;
5. modeliranje teoretski optimalne geometrije frakture u tanko proslojenom ležištu;
6. izrada optimalnog programa izvođenja hidrauličkog frakturiranja u tanko proslojenom ležištu;
7. izrada *FP* proizvodnog modela tanko proslojenog ležišta.

Ovdje je ključni korak izrada dijagrama ravnotežnih odnosa geometrije frakture koji se zasniva na 3D numeričkim simulacijama hidrauličkog frakturiranja i prikazuje funkcionalnu zavisnost ostvarenih poluduljina, dosegnutih dubina vrha i dna (visine) frakture u odnosu na volumen utisnute prethodnice kod nekog konstantnog protoka. Iz provedenih simulacija je za svaki volumen prethodnice (vrijeme utiskivanja) poznata i hidraulička širina frakture i efektivni tlak. Ekstrapolacijom pojedinačnih rješenja maksimalnih poluduljina frakture za graničnu visinu njena rasta određuje se globalno maksimalna poluduljina. Jednom kada je poznata, ova se poluduljina uzima kao optimalna. Nakon toga se pristupa modeliranju teoretski optimalne geometrije frakture *UFD* postupkom. Proračun se provodi iterativno mijenjajući masu utisnutog

podupirača (broja podupirača) u propusni dio frakture do zadovoljenja uvjeta da je poluduljina frakture iz prethodnog koraka jednaka izračunatoj prema *UFD* proceduri. Odavde se dobiva optimalna širina frakture. Zadatak je optimalnog programa hidrauličkog frakturiranja da za optimalnu poluduljinu i visinu kreira optimalnu širinu frakture ispunjenu podupiračem koja će u konačnosti dati maksimalno mogući indeks proizvodnosti. Rezultirajuća optimalna geometrija frakture mora pri tome kompenzirati negativne efekte uzrokovane linearnim skinom i turbulencijom plina ako postoje. Ovakav dizajn moguć je ako se primjeni *TSO* tehnika hidrauličkog frakturiranja.

Za razvoj nove metode značajni su radovi Pitakbunkate et al. (2011) i Yang et al. (2012). Tema njihovih istraživanja je bila funkcionalno povezivanje *UFD* postupka i procesa hidrauličkog frakturiranja u višeslojnim ležištima, s naglaskom na procjeni visine rasta frakture. Temeljna razlika između metodologije koju su prezentirali spomenuti autori i nove metodologije je u načinu određivanja optimalne geometrije frakture i izradi optimalnog programa hidrauličkog frakturiranja.

U odnosu na postupak Yanga et al. (2012) značajan pomak uveden novom metodom je funkcionalno povezivanje trodimenzionalnih numeričkih simulacija hidrauličkog frakturiranja i *UFD* postupka izračuna optimalne geometrije frakture. Novost je određivanje globalnog maksimuma poluduljine iz dijagrama ravnotežnih odnosa geometrije frakture koji se temelji na numeričkim simulacijama. Ovim povezivanjem omogućena je izrada optimalnog programa hidrauličkog frakturiranja koji će uz korištenje *TSO* tehnike rezultirati optimalnom širinom pri tome uvažavajući ograničenja rasta frakture.

S ciljem potvrđivanja hipoteze da je osnovom procjene distribucije geomehaničkih svojstava, efektivnog koeficijenta filtracije radnog fluida i propusnosti tanko proslojenih ležišta u kombinaciji s procjenom veličine smanjenja proizvodnosti bušotine kao posljedice tehnike proizvodnog opremanja ležišta/bušotine moguće, s relativno visokom razinom sigurnosti, odrediti njihov proizvodni potencijal, nova metoda je provjerena prema podacima tanko proslojenog ležišta PLQ-F u bušotinama SJ – 1 Dir i SJ – 2 Dir.

Svrha analize podataka iz bušotine SJ – 2 Dir bila je utvrditi maksimalno mogući dobitak u proizvodnosti za slučaj da je ležište bilo hidraulički frakturirano prema optimalnom programu izvođenja, sukladno novoj metodologiji. Cilj je izraditi optimalni program hidrauličkog frakturiranja koji će rezultirati maksimalno mogućim indeksom proizvodnosti.

Za postizanje tog cilja izrađena su dva 3D modela hidrauličkog frakturiranja, jedan temeljen na originalnoj zonaciji, i drugi temeljen na *TLA* zonaciji. Numeričke simulacije provedene su prema originalnom programu izvođenja, gdje je korekcijama geomehaničkih i filtracijskih svojstava pojedinih zona postignuta usklađenost mjerenog i simuliranog efektivnog tlaka u oba slučaja. Svrha ovog istraživanja bila je kvantitativno utvrditi razlike u geometrijama simuliranih fraktura i u odnosu na hidrodinamska mjerenja i proizvodni historijat procijeniti koja je geometrija vjerojatnija.

Iz provedenih simulacija modela koji je baziran na *TLA* zonaciji, rezultirajuća visina frakture sugerira snažan prodor u zone zasićene slojnom vodom, na što upućuje i proizvodni historijat, dok kod one koja se zasniva na originalnoj zonaciji to nije slučaj. Komparativnom analizom ova dva slučaja zaključeno je da je zbog preciznije definirane zonacije modela koji je baziran na *TLA* analizi rezultirajuća geometrija vjerojatnija.

Nakon toga je, simulacijama rasta frakture u usklađenom 3D modelu baziranom na *TLA* zonaciji provedeno istraživanje kojim je određen globalni maksimum poluduljine frakture, a samim time i teoretski globalni maksimum bezdimenzijskog indeksa proizvodnosti. Izrađen je i proizvodni model (*UFD*) gdje su izračunate ekvivalentne vrijednosti proizvodnih pokazatelja i optimalne širine frakture kod teoretskog globalnog maksimuma. Na kraju je dan optimalni program hidrauličkog frakturiranja kojeg karakteriziraju minimalna odstupanjima od teoretskih vrijednosti optimalne geometrije frakture. Ako se usporede količine utisnutog materijala za frakturiranje u odnosu na izvedeno stanje, utrošak je prepolovljen.

Zaključak provedenog istraživanja u bušotini SJ – 2 Dir je:

- da je zbog preciznije definirane zonacije modela koji je baziran na *TLA* analizi rezultirajuća geometrija frakture vjerojatnija;
- da je primjenom nove metodologije moguće odrediti takav program frakturiranja ležišta koji će rezultirati relativnim povećanjem proizvodnosti u odnosu na izvedeno stanje u iznosu 1,68;
- da se gotovo sav gubitak tlaka, uključujući onaj zbog turbulencije plina, događa u frakturi;
- da kod tehnike *FP* proizvodnost ležišta gotovo u potpunosti ovisi o geometriji frakture i propusnosti utisnutog podupirača;
- da je ukupni trošak hidrauličkog frakturiranja moguće svesti na optimalnu razinu.

Provedene analize za razradnu bušotinu SJ – 2 Dir pokazale su kako se drugačijim pristupom, uz korištenje prikazane metodologije, može unaprijediti proces projektiranja hidrauličkog frakturiranja i postići bolji rezultat u smislu ostvarene proizvodnosti ležišta.

Svrha istraživanja u bušotini SJ – 1 Dir bila je utvrditi najveći mogući dobitak u proizvodnosti prema novoj metodologiji. Cilj istraživanja bio je, za slučaj buduće razrade ležišta, izraditi optimalni program hidrauličkog frakturiranja koji će rezultirati maksimalno mogućim indeksom proizvodnosti.

Na primjeru bušotine SJ – 1 Dir prvo je detaljno prikazana procedura procjene proizvodnog potencijala prema konvencionalnom *UFD* pristupu. Na tom je primjeru ujedno provedeno istraživanje utjecaja visokih brzina protjecanja plina (efekta turbulencije plina) i utjecaju „nesavršenosti“ geometrije frakture. Zaključeno je sljedeće:

- da zanemarivanje utjecaja efekta turbulencije plina dovodi do preoptimističnih procjena indeksa proizvodnosti;
- da je utjecaj velikih brzina protjecanja plina toliko značajan da može smanjiti efektivnu propusnost frakture i više od šest puta u odnosu na deklarirane propusnosti proizvođača;
- da je utjecaj instalacije pješčanog zasipa na gubitak proizvodnosti ležišta zanemariv;
- da se gotovo sav gubitak tlaka, uključujući onaj zbog turbulencije plina, događa u frakturi;
- da kod tehnike *FP* proizvodnost ležišta gotovo u potpunosti ovisi o geometriji frakture i propusnosti utisnutog podupirača;
- da je izračunata optimalna geometrija frakture unutar depresije na ležište od maksimalno 60% optimalna i za svaki drugi uvjet dinamičkog tlaka, dok je u preostalom dijelu prihvatljiva.

Sa svrhom izrade optimalnog programa hidrauličkog frakturiranja prema novoj metodi izrađen je 3D model hidrauličkog frakturiranja. Ovdje su korigirane vrijednosti geomehaničkih svojstava i ukupnih koeficijenta filtracije ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir iz poglavlja 4.4.4 aplicirane na zone/proslojke ležišta PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir iz relevantne *TLA* analize. Nakon provedenih simulacija, i određivanja optimalne geometrije frakture, prvo teoretski optimalne prema *UFD* proceduri i nakon toga prema optimalno dizajniranom programu hidrauličkog

frakturiranja, na kraju je izrađen *FP* proizvodni model. Usporedba ključnih proizvodnih pokazatelja geometrije frakture pokazala je zanemarive razlike. Pri tome je povećanje proizvodnosti ležišta opremljenog tehnikom *FP* u odnosu na konvencionalno perforirano ležište (engl. *Folds of Increase*) jednako 1,96.

Provedena je i komparativna analiza proizvodnog potencijala ležišta određenog konvencionalnim *UFD* pristupom i proizvodnog potencijala proizašlog iz primjene nove metode. Cilj ove analize bio je utvrđivanje kvantitativnih razlika i veličine pogreške dosadašnje prakse. Usporedbom ključnih proizvodnih pokazatelja i geometrije frakture vide se velike razlike. Razlog leži u načinu kako je određena visina frakture i masa podupirača koja će biti utisnuta u frakturu. Dok je kod određivanja maksimalnog indeksa proizvodnosti konvencionalnim *UFD* pristupom nužno pretpostaviti visinu frakture i masu podupirača, kod nove metodologije se geometrija (a time i masa) određuje numeričkim simulacijama. Na taj način dobiva se realistična, ostvariva geometrija frakture.

Iz provedenih istraživanja može se zaključiti slijedeće:

- konvencionalni *UFD* pristup određivanja optimalne geometrije frakture može dovesti do nerealnih procjena indeksa proizvodnosti;
- primjenom nove metodologije, kod koje je ključni korak izrada dijagrama ravnotežnih odnosa geometrije frakture, moguće je realistično odrediti maksimalnu poluduljinu u odnosu na graničnu visinu frakture.
- usporedbom ključnih proizvodnih pokazatelja i geometrije frakture prema *UFD* proračunu i prema optimalnom programu hidrauličkog frakturiranja te njihovih razlika potvrđena je opravdanost primjene nove metode.

Ovime je dokazano kako je primjenom nove metodologije moguće odrediti takav program frakturiranja ležišta koji će rezultirati geometrijom frakture koja se zanemarivo razlikuje od one uvjetovane *UFD* postupkom. Funkcionalnim povezivanjem 3D numeričkih simulacija i *UFD* postupka određivanja optimalne geometrije frakture, unaprijeđen je postupak procjene proizvodnog potencijala tanko proslojenih ležišta. Pri tome je ključni korak izrada dijagrama ravnotežnih odnosa geometrije frakture.

Ostvarenim vrijednostima relativnog povećanja proizvodnosti u odnosu na postojeće stanje proizvodnog opremanja u obje bušotine potvrđena je hipoteza doktorskog rada.

Znanstveni doprinos očituje se u razvoju jedinstvene metode odabira optimalnog načina frakturiranja u bušotinama koje proizvode plin iz tanko proslojenih ležišta u svrhu postizanja maksimalno mogućih indeksa proizvodnosti. Prikazana metoda može se univerzalno primijeniti na tanko proslojenim ležištima različitih kompleksnosti bilo kojeg lokaliteta.

Prikazani postupak dobra je osnova za daljnja istraživanja u vidu interaktivnog povezivanja određivanja maksimalno mogućeg indeksa proizvodnosti (proizvodnog potencijala) prema novoj metodologiji i modela razrade ležišta s ekonomskim modelom izračuna „neto sadašnje vrijednosti“. Stavljanjem u funkcijsku zavisnost varijacija optimalnih poluduljina frakture (veličine ulaganja), proizvodnje bušotine/a (polja) u funkciji vremena i poluduljina frakture, i rezultirajuće neto sadašnje vrijednosti, dobije se ploha u trodimenzionalnim koordinatnom sustavu s točkom globalnog maksimuma. Ova točka daje odgovor na pitanje koja je to optimalna poluduljina frakture i tempo crpljenja ležišta koji će rezultirati maksimalnim financijskim rezultatom.



## 6. LITERATURA

1. Bale, A., Owren, K., Smith, M.B. (1994): Propped Fracturing as a Tool for Sand Control and Reservoir Management. SPE 24992-PA.
2. Cantini, S., Baldini, D., Beretta, E., Loi, D., & Mazzoni, S.: Reservoir Permeability from Wireline Formation Testers., SPE 164924 (2013).
3. Coates, G.; Dumanoir, L.: A new Approach to improved Log Derived Permeability, SPWLA Symposium (1973).
4. Cooke, C, E, Jr.: Conductivity of Fracture Proppants in Multiple Layers , JPT (Sep, 1973) 1101-1107;; Trans, AIME, 255.
5. Cornell, D. & Katz, D.L.: Flow of Gases through Consolidated Porous Media, Industrial and Engineering Chemistry (1953) 45, No. 10, 2145.
6. Cinco-Ley, W.J., Hazebroek, P. & Strickler, W.R.:(1962) Effect of Vertical Fractures on Reservoir Behavior – Compressible Fluid Case, SPEJ (June 1962) 87.
7. Cinco-Ley, H., Samaniego-V., F., Dominguez-A., N. (1977): Effect of Wellbore Storage and Damage on the Transient Pressure Behavior of Vertically Fractured Wells. SPE 6752.
8. Cinco-Ley, H., Samaniego-V., F. (1981): Transient Pressure Analysis for Fractured Wells. J. Pet Tech (September 1981) 1749-1766.
9. Craft, B. C. & Hawkins, M. F. Jr. (1959): Applied Petroleum Reservoir Engineering. Prentice – Hall Book Co Inc., Englewood Cliffs, New York.
10. Čikeš, M. (2015): Proizvodno inženjerstvo nafte i plina. Rudarsko-geološko-naftni-fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
11. De Jesus Lopez Hernandez, H.: Optimal Fracture Treatment Design for Dry Gas Wells Maximizes Well Performance in the Presence of Non-Darcy Flow Effects, Master's Thesis, TAMU, (August 2004).
12. Dietz, D.N.: Determination of Average Reservoir Pressure from Build-Up Surveys, JPT (August, 1965) 955-959; Trans. AIME, 234,
13. Economides, M.J., Deimbacher, F.X., Brand, C.W. & Heinemann, Z.E.(1990): Comprehensive Simulation of Horizontal Well Performance, SPE 20717 (1990).
14. Economides, M.J., Hill, A.D. & Ehlig-Economides, C. (1994): Petroleum Production Systems. Prentice Hall PTR, New Jersey.

15. Economides, M.J., Valko, P.P. & Wang, X. (2001): Recent Advances in Production Engineering. JCPT (October 2001) 35-44.
16. Economides, M.J., Oligney, R.E. & Valko, P.P. (2002): Unified Fracture Design. Orsa Press, Houston.
17. Economides, M.J., Hill, A.D. & Ehlig-Economides, C. (2012): Petroleum Production Systems. Prentice Hall PTR, New Jersey.
18. Ellis, R.C. (1998): An Overview of Frac Packs: A Technical Revolution (Evolution) Process. JPT (50) (1): 66-68.
19. Fung, R. L., Vilayakumar. S., and Cormack, D. E. (1987): Calculation of Vertical Fracture Containment in Layered Formations. SPE Form Eval 2 (4).
20. Kevrić, I (1999): Utjecaj mehaničkih svojstava stijena na geometriju hidraulički stvorene frakture, tlak frakturiranja i količinu radnog fluida. Magistarski rad. Rudarsko-geološko-naftni-fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
21. Mack, M. G. and Warpinski, N. R. (2000): Mechanics of Hydraulic Fracturing. In Reservoir Stimulation, third edition, ed. M. J. Economides and K.G. Nolte, Chap. 6. West Sussex, UK: John Wiley & Sons.
22. Mathur, A.K., Ning, X., Marcinew, R.B., Ehlig-Economides, C.A., Economides, M.J.: "Hydraulic Fracture Stimulation of Highly Permeable Formations: The Effect of Critical Fracture Parameters on Oilwell Production and Pressure" SPE 30652 (1995).
23. McGuire, M. & Sikora, V.J.(1960): The Effect of Vertical Fractures on Well Productivity, Trans., AIME (1960) 219, 401-403.
24. Muskat, M. (1937): The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media first edition. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York City.
25. Flowers, J.R., Hupp, M.T. and Ryan, J.D.: "The Results of Increased Fracture Conductivity on Well Performance in a Mature East Texas Gas Field," paper SPE 84307 presented at the 2003 Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Denver, 5-8 October.
26. Forchheimer, P.: Wasserbewegung durch Bode, ZVDI (1901) 45, 1781.
27. Geertsma, J.: Estimating the Coefficient of Inertial Resistance in Fluid Flow through Porous Media, Society of Petroleum Engineering Journal (October 1974) 445.
28. Golan, M. & Whitson, C.H. (1995): Well Performance Second Edition, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.

29. Hannah, R.R., Park, E.I., Porter, D.A., Black, J.W. (1994): Propped Fracturing as a Tool for Sand Control and Reservoir Management. SPE 24992-PA.
30. Heinemann, Z.E. (2005): Fluid Flow in Porous Media, Textbook Series, Vol 1, Montanuniversitat Leoben (2002).
31. Hurst, W.,: Establishment of The Skin Effect and Its Impediment to Fluid Flow into a Well Bore, Pet. Eng., (Oct 1953) B-6 – B-16,
32. Joshi, S. D.: Augmentation of Well Productivity with Slant and Horizontal Wells, JPT (June, 1988) 729-739,
33. Karakas, M, & Tariq, S, M.: Semianalytical Productivity Models for Perforated Completions, JPT (Feb, 1991) 73-81,
34. Liu, S. and Valko, P.P. (2018): A Rigorous Hydraulic-Fracture Equilibrium-Height Model for Multilayer Formations, SPE 173335-PA.
35. Lopez-Hernandez, H. D., Valko, P., and Pham, T. T.(2004): Optimum Fracture Treatment Design Minimizes the Impact of Non-Darcy Flow Effects, paper SPE 90195, presented at the 2004 SPE Annual Technical Conference & Exhibition, Houston, Texas, Sept 26 – 29, 2004
36. Penny, G.S., and Jin, L. (1995): The Development of Laboratory Correlations Showing and the Impact of Multiphase Flow, Fluid, and Proppant Selection upon Gas Well Productivity, paper SPE 30494 presented at the 1995 SPE Technical Conference Exhibition, Dallas, 22-25 October.
37. Perkins, T.K., & Kern, L.R. (1961): Width of Hydraulic Fractures. JPT, Trans AIME 222: 937-949.
38. Pitakbunkate, T., Yang, M. & Valko, P.P. (2011): Hydraulic Fracture Optimization with a p-3D Model, paper SPE 142303, 2011.
39. Prats, M., Hazebroek, P. & Strickler, W.R. (1962): Effect of Vertical Fractures on Reservoir Behavior – Compressible Fluid Case. SPEJ (June 1962) 87.
40. Pursell, D.A., Holditch, S.A. and Blakeley, D.M.: Laboratory Investigation of Inertial Flow in High-Strength Fracture Proppants, paper SPE 18319 presented at the 1988 Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Houston, 2-5 October.
41. Roodhart, L.P., Davies, D.R., Shlyapobersky, J. & Wong, G.K. (1994): Frac-and-Pack Stimulation: Application, Design, and Field Experience. SPE 26564-PA.

42. Romero, D.J., Valko, P.P. & Economides (2002), M.J.: Optimization of the Productivity Index and the Fracture Geometry of a Stimulated Well With Fracture Face and Choke Skins, paper SPE 73758, 2002.
43. Valko, P.P., Doublet, L.E. & Blasingame, T.A.: Development and Application of the Multiwell Productivity Index (MPI), SPEJ (March 2000) 21.
44. Valko, P.P. & Economides, M.J.: Performance of a Longitudinally Fractured Horizontal Well, (March 1996) 11-19.
45. Valko, P.P. & Economides, M.J. (1998): Heavy Crude Production from Shallow Formations: Long Horizontal Wells Versus Horizontal Fractures, paper SPE 50421, 1998.
46. Valko, P.P. (2006): HF2D Frac Design Spreadsheet Manual. TAMU, (April 2001, updated May 30, 2006), <http://pumpjack.tamu.edu/~valko>.
47. van Everdingen A.F. (1953): The Skin Effect and its Influence on the Productive Capacity of a Well. In Transactions of the Society of Petroleum Engineers, Vol. 198, 171-176. Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers.
48. Vincent, M.C., Pearson, M., and Kullman, J. (1999): Non-Darcy and Multiphase Flow in Propped Fractures: Case Studies Illustrate the Dramatic Effect on Well Productivity, paper SPE 54630 presented at the 1999 SPE Western Regional Meeting, Anchorage, 26-28 May.
49. Weng, X., Kresse, O., Cohen, C. E. et al. (2011): Modeling of Hydraulic Fracture Network Propagation in a Naturally Fractured Formation. SPE Prod & Oper 26 (4): 368-380. SPE-140253-PA.
50. Zeng, F., Zhao, G. (2008): Semianalytical Model for Reservoirs with Forchheimer's Non-Darcy Flow. SPE Res Eval & Eng 11 (4) 280-291. SPE-100540-PA-P.
51. INA (2013): Rudarski projekt eksploatacije ugljikovodika na eksploatacijskom polju ugljikovodika „Sjeverni Jadran“ – plinsko polje SJ, INA, 2013.
52. INA-ENI (2014): SJ 2 Dir and SJ 4 Dir Wells Petrophysical Analysis, INA-ENI, Milano, 2014.
53. INA-ENI (2013): SJ – 1 Dir Well Petrophysical Analysis, INA-ENI, Milano, 2013.
54. INA (2013): SJ – 1 Dir Well Test Report, INA, 2013.
55. INA (2014): SJ Prospect Reservoir Study, INA, 2014.
56. Yang, M.,Valko, P.P. & Economides, M.J. (2012): On the Fracture Height Migration under Unified Fracture Design Optimization, paper SPE 161641, 2012.

## 7. PRILOZI

### 7.1. PRILOG 1. Proizvodnost plinske bušotine kod poluustaljenog stanja protjecanja.

Protjecanje fluida kroz homogenu izotropno ležište u bušotinu temelji se na poznatoj Forchheimerovoj jednadžbi (Forchheimer 1901):

$$\frac{dp}{dr} = \left( \frac{dp}{dr} \right)_{Darcy} + \left( \frac{dp}{dr} \right)_{ne-Darcy}, \quad (8.1)$$

gdje je  $\left( \frac{dp}{dr} \right)_{Darcy}$  član jednadžbe koji opisuje gubitak tlaka kao posljedicu laminarnog protjecanja plina te je sukladno Darcyjevom zakonu jednak:

$$\left( \frac{dp}{dr} \right)_{Darcy} = \frac{\mu_g}{k} v_g, \quad (8.2)$$

a  $\left( \frac{dp}{dr} \right)_{ne-Darcy}$  član jednadžbe koji opisuje odstupanje od Darcyjeva zakona kao posljedice visoke brzine protoka plina i izražava se kao dodatni gubitak tlaka prema obrascu:

$$\left( \frac{dp}{dr} \right)_{ne-Darcy} = \beta_R \rho_g v_g^2. \quad (8.3)$$

Gustoća plina jednaka je:

$$\rho_g = \frac{p M_g}{Z R T} = \frac{p M_z \gamma_g}{Z R T}, \quad (8.4)$$

a brzina plina u bilo kojem radijusu drenažnog područja bušotine određena izrazom:

$$v_g = \frac{q}{A} = \frac{q_g B_g}{2 \pi r h}. \quad (8.5)$$

Volumetrijski faktor plina određen je izrazom:

$$B_g = \frac{Z T p_{sc}}{p T_{sc} Z_{sc}} = \frac{Z T p_{sc}}{p T_{sc}}. \quad (8.6)$$

Uvođenjem jednadžbi (8.2), (8.3), (8.4), (8.5) i (8.6) u jednadžbu (8.1) dobiva se izraz koji opisuje radijalno protjecanje plina kroz homogenu izotropno ležište u bušotinu:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu}{k} \frac{q_{gSC}}{2\pi r h} \frac{ZT}{p} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} + \beta_R \frac{p M_z \gamma_g}{ZRT} \left( \frac{q_{gSC}}{2\pi r h} \frac{ZT}{p} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2. \quad (8.7)$$

Pomnožimo li izraz (8.7) s  $\frac{2p}{\mu_g Z} dr$ :

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu_g}{k} \frac{q_{gSC}}{2\pi r h} \frac{ZT}{p} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} + \beta_R \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{q_{gSC}^2}{2^2 \pi^2 r^2 h^2} \frac{ZT}{p} \left( \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2 \left/ \times \frac{2p}{\mu_g Z} dr, (8.8) \right.$$

dobivamo:

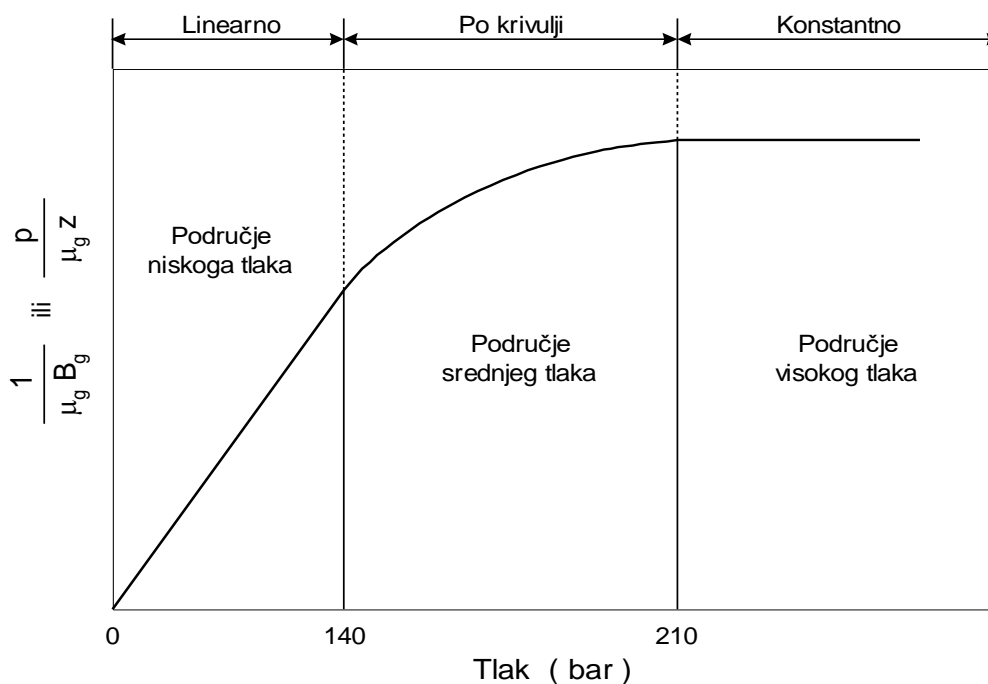
$$\frac{2p}{\mu_g Z} dp = \frac{T q_{gSC}}{\pi r k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} dr + \beta_R \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{q_{gSC}^2 T}{2\pi^2 r^2 h^2 \bar{\mu}_g} \left( \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2 dr. \quad (8.9)$$

Izraz (8.9) integriramo kako slijedi;

$$\int_{p_{wfs}}^{p_e} \frac{2p}{\mu_g Z} dp = \frac{T q_{gSC}}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \int_{r_w}^{r_e} \frac{1}{r} dr + \beta_R \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{q_{gSC}^2 T}{2\pi^2 h^2} \left( \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2 \int_{r_w}^{r_e} \frac{1}{\mu_g r^2} dr \quad (8.10)$$

Izraz na lijevoj strani jednadžbe naziva se funkcija pseudotlaka:

$$m(p) = \int_{p_{wfs}}^{p_e} \frac{2p}{\mu_g Z} dp. \quad (8.11)$$



Slika 63. Ponašanje funkcije  $p/(\mu_g Z)$  ili  $1/(\mu_g B_g)$  u zavisnosti o tlaku  $p$ .

Slika 60. prikazuje karakteristično ponašanje funkcije  $p/(\mu_g Z)$  ili  $1/(\mu_g B_g)$  u zavisnosti o tlaku  $p$ . Rješenje jednadžbe (8.11) je površina ispod krivulje funkcije  $p/(\mu_g Z)$  ili  $1/(\mu_g B_g)$ . Iz grafa se mogu razlučiti tri karakteristična područja:

- 1) Područje niskoga tlaka ( $p < 140$  bar), gdje postoji linearna zavisnost funkcije  $p/(\mu_g Z)$  o tlaku  $p$  i rješenje integrala glasi:

$$m(p) = \int_{p_{wfs}}^{p_R} \frac{2p}{\mu_g Z} dp = \frac{1}{(\mu_g Z)_{sr}} (p_R^2 - p_{wfs}^2). \quad (8.12)$$

- 2) Područje srednjeg tlaka ( $140 \leq p \leq 210$  bar), gdje zavisnost funkcije  $p/(\mu_g Z)$  o tlaku  $p$  ima oblik krivulje. Integral  $m(p)$  rješava se numeričkom integracijom.

- 3) Područje visokoga tlaka ( $p > 210$  bar), gdje funkcija  $p/(\mu_g Z)$  zadržava približno konstantnu vrijednost za bilo koju vrijednost tlaka  $p$ , rješenje integrala glasi:

$$m(p) = \int_{p_{wfs}}^{p_R} \frac{2p}{\mu_g Z} dp = \frac{2p_R}{(\mu_g Z)_{p_R}} (p_R^2 - p_{wfs}^2). \quad (8.13)$$

Za valorizaciju gubitka tlaka koji nastaje zbog visokih brzina protjecanja u bilo kojem segmentu - radijusu, a ovdje je prikazano u punom drenažnom radijusu viskoznost plina koja se nalazi pod integralom na desnoj strani jednadžbe (8.10)  $\mu_g$ , može se aproksimirati sa srednjom vrijednošću viskoznosti plina  $\bar{\mu}_g$ , znači kod srednjeg tlaka promatranog segmenta, odnosno u ovom slučaju punom drenažnom radijusu bušotine  $(p_e - p_{wfs})/2$ . Integracijom jednadžbe (8.10), izraz za radijalno protjecanje plina kroz homogeno izotropno ležište u bušotinu koji uvažava gubitak tlaka uslijed Darcyjeva laminarnog protoka i dodatnog gubitka tlaka kao posljedice visokih brzina protoka fluida ima oblik:

$$m(p_e) - m(p_{wfs}) = \frac{T}{\pi k h} \frac{P_{SC}}{T_{SC}} \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) q_{gSC} + \beta_R \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{T}{2\pi^2 h^2 \bar{\mu}_g} \left( \frac{P_{SC}}{T_{SC}} \right)^2 \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right) q_{gSC}^2 \quad (8.14)$$

Najčešće se u praksi kod uspostavljenog ustaljenog (isto tako i kod poluustaljenog) stanja protjecanja  $1/r_e$  zanemaruje, budući da je  $1/r_e \ll 1/r_w$ , a debljina ležišta  $h$  zamjenjuje sa samo

raskrivenim (perforiranim) dijelom ležišta  $h_p$ , kako bi se valorizirao efekt parcijalne penetracije bušotine u ležište. Također, pod pretpostavkom da je efekt visokih brzina protjecanja značajan samo u pribušotinskoj zoni, viskoznost plina koja se nalazi pod integralom na desnoj strani jednadžbe (8.10)  $\bar{\mu}_g$  može se aproksimirati s konstantnom vrijednošću viskoznosti plina kod tlaka bušotine  $\mu_{g,wf}$ . Temeljem izrečenih pretpostavki obrazac (8.14) tada poprima svoj konačni oblik:

$$m(p_e) - m(p_{wfs}) = \frac{T}{\pi k h T_{SC}} \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) q_{gSC} + \beta_R \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{T}{2\pi^2 h_p^2 \mu_{g,wf} r_w} \left(\frac{p_{SC}}{T_{SC}}\right)^2 q_{gSC}^2. \quad (8.15)$$

Često se jednadžba (8.14) prikazuje u kvadratnom obliku:

$$m(\bar{p}_R) - m(p_{wfs}) = a q_{gSC} + b q_{gSC}^2, \quad (8.16)$$

gdje je  $a$  član koji opisuje gubitak tlaka uslijed Darcyjeva laminarnog protoka jednak:

$$a = \frac{T}{\pi k h T_{SC}} \left[ \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) \right], \quad (8.17)$$

a  $b$  član jednadžbe koji opisuje gubitak tlaka kao posljedice visokih brzina protoka plina ima oblik:

$$b = \beta_R \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{T}{2\pi^2 h^2 \bar{\mu}_g} \left(\frac{p_{SC}}{T_{SC}}\right)^2 \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e}\right), \quad (8.18)$$

gdje je rješenje kvadratne jednadžbe:

$$q_{gSC} = \frac{\sqrt{a^2 + 4b[m(\bar{p}_R) - m(p_{wfs})]} - a}{2b}. \quad (8.19)$$

Član jednadžbe  $b$  može se pisati i na sljedeći način (Golan 1995):

$$b = \frac{T}{\pi k h T_{SC}} D_R, \quad (8.20)$$

iz čega slijedi da je koeficijent  $D_R$ , koji se još naziva koeficijent turbulencije ili koeficijent ne-Darcyjeva protoka kroz ležište, jednak:



$$D_R = \frac{\beta_R \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{T}{2 \pi^2 h^2 \bar{\mu}_g} \left( \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2 \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right)}{\frac{T}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}}}. \quad (8.21)$$

Uvođenjem koeficijenta  $D_R$ , jednačba (8.14) i jednačba (8.16) mogu se preformulirati i na sljedeći način:

$$m(\bar{p}_R) - m(p_{wfs}) = \frac{T}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} q_{gSC} \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) + D_R q_{gSC} \right], \quad (8.22)$$

gdje je koeficijent ne-Darcyjeva protoka  $D_R$  sukladno obrascu (8.21) jednak:

$$D_R = \beta \frac{M_z \gamma_g p_{SC}}{RT_{SC}} \frac{k}{2 \pi h \bar{\mu}_g} \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right). \quad (8.23)$$

Ukoliko se pretpostavi da je efekt visokih brzina protjecanja značajan samo u pribušotinskoj zoni i vrijedi jednačba (8.15), a  $b$  član kvadratne jednačbe određen temeljem obrasca (8.18), koeficijent  $D_R$  poprima sljedeći oblik:

$$D_R = \beta_R \frac{M_z \gamma_g p_{SC}}{RT_{SC}} \frac{k h}{2 \pi h_p^2 \mu_{g,wf} r_w}. \quad (8.24)$$

Kako bi valorizirali udio gubitka tlaka kao posljedice visokih brzina protjecanja fluida u ukupnom gubitku tlaka, Zeng i Zhao (2008) su za bušotinu koja proizvodi konstantnim protokom u radijalnom sustavu u uvjetima ustaljenog stanja protjecanja, postavili omjer člana jednačbe (8.1) koji opisuje odstupanje od Darcyjeva zakona kao posljedice visoke brzine protoka fluida  $(dp/dr)_{ne-Darcy}$  i člana jednačbe koji opisuje gubitak tlaka kao posljedicu laminarnog protjecanja fluida  $(dp/dr)_{Darcy}$ :

$$\frac{(dp/dr)_{ne-Darcy}}{(dp/dr)_{Darcy}} = \frac{\beta \rho v^2}{\frac{\mu}{k}} = \frac{\beta \rho k}{\mu} \frac{q}{2 \pi r h}. \quad (8.25)$$

Za plinsku bušotinu omjer se može napisati uvođenjem obrazaca (8.7) u izraz (8.25) na sljedeći način:

$$\begin{aligned} \frac{(dp/dr)_{ne-Darcy}}{(dp/dr)_{Darcy}} &= \frac{\beta_R \frac{p M_z \gamma_g}{Z R T} \left( \frac{q_{gSC}}{2 \pi r h} \frac{Z T}{p} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2}{\frac{\mu q_{gSC}}{k} \frac{Z T}{2 \pi r h} \frac{p_{SC}}{p} \frac{p_{SC}}{T_{SC}}} = \\ &= \beta_R \frac{p M_z \gamma_g}{Z R T} \frac{q_{gSC} k}{2 \pi r h \mu} \frac{Z T}{p} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} = \beta_R \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{q_{gSC} k}{2 \pi r h \mu} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \end{aligned} \quad (8.26)$$

Jednadžba (8.25) pokazuje da omjer  $(dp/dr)_{ne-Darcy}/(dp/dr)_{Darcy}$  rapidno pada s porastom radijusa promatranja (Zeng i Zhao, 2008). Isto vrijedi i za jednadžbu (8.26). Autori su u citiranom radu pokazali da kod konstantnog protoka nafte od 100 m<sup>3</sup>/dan ovaj odnos poprima vrijednost 1 na radijusu (udaljenosti od centra bušotine) od 10 m što znači da vrijednost udjela pojedine komponente u ukupnoj veličini gubitka tlaka postaje jednaka na toj udaljenosti. Kako se kretanje udjela tlaka prati prema centru bušotine, dominacija ne-Darcyjeve komponente rapidno raste, ali se ne događa isključivo u pribušotinskoj zoni. Zbog toga, pojednostavljenje svođenjem isključivo unutar beskonačno male udaljenosti  $r_w$ , kao što je to prikazano u jednadžbi (8.15), ignorirajući pri tome ne-Darcyjevu komponentu u ostatku ležišta, nije u potpunosti ispravno (Zang at al., 2006). Gubitak tlaka kao posljedica visokih brzina protjecanja naročito je izražena kod protoka plina. Uvođenjem funkcije pseudotlaka i integracijom po punom drenažnom profilu bušotine, udio gubitka tlaka kao posljedice visokih brzina protjecanja plina može se prikazati i na sljedeći način.

$$\frac{(dp/dr)_{ne-Darcy}}{(dp/dr)_{Darcy}} = \frac{\left[ m(p_e) - m(p_{wfs}) \right]_{ne-Darcy}}{\left[ m(p_e) - m(p_{wfs}) \right]_{Darcy}} = \frac{\beta_R \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{T}{2 \pi^2 h^2 \bar{\mu}_g} \left( \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2 \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right) q_{gSC}^2}{\frac{T}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) q_{gSC}}. \quad (8.27)$$

Jednadžba (8.14) važeća je za ustaljeno stanje protjecanja (engl. *Steady State Condition*) koje implicira konstantni tlak na vanjskoj granici drenaže  $r_e$ , odnosno  $\partial p_e / \partial t = 0$ . Ovo stanje protjecanja vrlo je rijetko, a može ga se aproksimirati utjecajem snažnog vodenog utoka ili kao posljedicu utjecaja okolnih injekcionih bušotina (Economides 1994). Puno realističnija situacija jest poluustaljeno stanje protjecanja (engl. *Pseudosteady State Condition*), koje karakterizira konstantna promjena tlaka u jedinici vremena  $\partial p_e / \partial t = konst.$  na vanjskoj granici drenaže  $r_e$ .

Rješenje jednadžbe difuzije radijalnog modela protjecanja fluida u laminarnom području prema kojem je vrijednost tlaka  $p$  u bilo kojoj točki ležišta  $r$  jednaka je:

$$p = p_{wfs} + \frac{qB\mu}{2\pi kh} \left[ \ln\left(\frac{r}{r_w}\right) - \frac{r^2}{2r_e^2} \right]. \quad (8.28)$$

Za  $r = r_e$  jednađba (8.28) poprima sljedeći oblik:

$$p_e = p_{wfs} + \frac{qB\mu}{2\pi kh} \left[ \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{1}{2} \right]. \quad (8.29)$$

Budući da u uvjetima poluustaljenog stanja protjecanja tlak na granici drenaže  $p_e$  nije poznat, u najvećem dijelu proizvodnog vijeka bušotine, jednađba (8.28) za praktične svrhe nije korisna (Economides et al. 1994). Zbog toga je primjerena formulacija koja koristi srednji ležišni tlak  $\bar{p}_R$ , kojeg je u svakom trenutku moguće odrediti uz pomoć testa porasta tlaka. Srednji ležišni tlak  $\bar{p}_R$  određen je sljedećim izrazom:

$$\bar{p}_R = \frac{\int_{r_w}^{r_e} p dV}{\int_{r_w}^{r_e} dV} = \frac{\int_{r_w}^{r_e} p dV}{\pi(r_e^2 - r_w^2)h\phi} \approx \frac{\int_{r_w}^{r_e} p dV}{\pi r_e^2 h\phi}. \quad (8.30)$$

Budući da je  $dV = 2\pi r h \phi dr$ , jednađba (8.28) može se preformulirati na sljedeći način:

$$\bar{p}_R - p_{wfs} = \frac{2}{r_e^2} \frac{qB\mu}{2\pi kh} \int_{r_w}^{r_e} \left[ \ln\left(\frac{r}{r_w}\right) - \frac{r^2}{2r_e^2} \right] r dr. \quad (8.31)$$

Integracijom jednađbe (8.31) jednađba (8.28) poprima konačan oblik:

$$\bar{p}_R - p_{wfs} = \frac{qB\mu}{2\pi kh} \left[ \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} \right]. \quad (8.32)$$

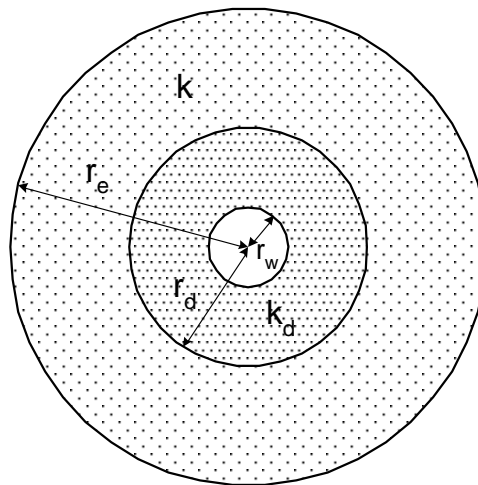
Ako se poslužimo metodom analogije, tada izraz za radijalno protjecanje plina pri poluustaljenom stanju protjecanja kroz homogenu izotropno ležište u bušotinu koji uvažava gubitak tlaka uslijed Darcyjeva laminarnog protoka i dodatnog gubitka tlaka kao posljedice visokih brzina protoka plina kroz ležište u bušotinu ima oblik:

$$m(\bar{p}_R) - m(p_{wfs}) = \frac{T q_g p_{SC}}{\pi k h T_{SC}} \left[ \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} \right] + \beta_R \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{q_g^2 T}{2\pi^2 h^2 \bar{\mu}_g} \left( \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2 \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right). \quad (8.33)$$

U nastavku ovog poglavlja razmatra se efekt promjene propusnosti u pribušotinskoj zoni. Smanjenje efektivne propusnosti u pribušotinskoj zoni posljedica je dva fenomena (Golan 1995):

- fenomena promjene relativne propusnosti za plin i kondenzat (naftu), i
- fenomena promjene apsolutne propusnosti kao posljedice čepljenja pora i prslina u poroznoj stijeni.

Slika 61. prikazuje karakteristični model s dva koncentrična kruga različitih propusnosti kako ga je prvi prikazao Muskat (1937).



Slika 64. Model promjene propusnosti u pribušotinskoj zoni

Ukupni gubitak tlaka koji se događa pri radijalnom protjecanju plina i pri ustaljenom stanju protjecanja plina kroz homogeno izotropno ležište u bušotinu, s oštećenom zonom radijusa  $r_d$ , promijenjene propusnosti  $k_d$ , matematički se može izraziti kao zbroj gubitka tlaka u neoštećenom ležištu i gubitaka tlaka koji se javlja u pribušotinskoj zoni promijenjene propusnosti:

$$\frac{dp}{dr} = \left[ \left( \frac{dp}{dr} \right)_{Darcy} + \left( \frac{dp}{dr} \right)_{ne-Darcy} \right]_R + \left[ \left( \frac{dp}{dr} \right)_{Darcy} + \left( \frac{dp}{dr} \right)_{ne-Darcy} \right]_d. \quad (8.34)$$

Sukladno metodologiji prikazanoj u jednadžbama (8.1) do (8.14), integracijom u granicama karakterističnim za svako područje protjecanja, izraz za radijalno protjecanje plina pri ustaljenom stanju protjecanja kroz homogeno izotropno ležište u bušotinu s oštećenom zonom radijusa  $r_d$  i promijenjene propusnosti  $k_d$  koji uvažava ukupni gubitak tlaka uslijed

Darcyjeva laminarnog protoka i dodatni ukupni gubitak tlaka kao posljedicu visokih brzina protoka plina kroz ležište i oštećenu zonu u bušotinu ima oblik:

$$\begin{aligned}
m(\bar{p}_R) - m(p_{wfs}) &= \\
&= \left[ \frac{T q_{gSC}}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_d} \right) \right] + \beta_R \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{q_{gSC}^2 T}{2 \pi^2 h^2 \bar{\mu}_g} \left( \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2 \left( \frac{1}{r_d} - \frac{1}{r_e} \right) \right]_R + \cdot \quad (8.35) \\
&\left[ \frac{T q_{gSC}}{\pi k_d h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \left[ \ln \left( \frac{r_d}{r_w} \right) \right] + \beta_d \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{q_{gSC}^2 T}{2 \pi^2 h^2 \bar{\mu}_g} \left( \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2 \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_d} \right) \right]_d
\end{aligned}$$

Pri tome se ukupni gubitak tlaka, koji se odnosi samo na Darcyjev laminarni protok, može iskazati kroz slijedeću jednadžbu:

$$\left[ m(\bar{p}_R) - m(p_{wfs}) \right]_{Darcy} = \frac{T q_{gSC}}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_d} \right) \right] + \frac{T q_{gSC}}{\pi k_d h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \left[ \ln \left( \frac{r_d}{r_w} \right) \right]. \quad (8.36)$$

Craft i Hawkins (1959) dali su matematičku formulaciju koja opisuje veličinu dodatnog smanjenja tlaka uslijed Darcyjeva linearnog protoka kao posljedice promjene propusnosti u pribušotinskoj zoni radijusa  $r_d$ , preko bezdimenzijskog *skin* faktora, uslijed oštećenja pribušotinske zone  $s_d$ :

$$s_d = \left( \frac{k}{k_d} - 1 \right) \ln \left( \frac{r_d}{r_w} \right), \quad (8.37)$$

tako da izraz (8.36) za ukupni gubitak tlaka, koji se odnosi na Darcyjev laminarni protok, koji uvažava promjene propusnosti u pribušotinskoj zoni i u koliko se sukladno postupku prikazanom kroz obrasce (8.28) do (8.32) razmatra poluustaljeno stanje protjecanja poprima sljedeći oblik:

$$\Delta m(p)_{Darcy} = \frac{T q_{gSC}}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + s_d \right]. \quad (8.38)$$

Ukupni gubitak tlaka kao posljedicu visokih brzina protoka plina kroz neoštećeno ležište i pribušotinsku zonu promijenjene propusnosti, može se izraziti kroz slijedeću jednadžbu:

$$\begin{aligned}
\left[ m(\bar{p}_R) - m(p_{wfs}) \right]_{ne-Darcy} &= \\
&= \beta_R \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{q_{gSC}^2 T}{2 \pi^2 h^2 \bar{\mu}_g} \left( \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2 \left( \frac{1}{r_d} - \frac{1}{r_e} \right) + \beta_d \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{q_{gSC}^2 T}{2 \pi^2 h^2 \bar{\mu}_g} \left( \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2 \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_d} \right), \quad (8.39)
\end{aligned}$$

separacijom varijabli dobiva se:

$$\Delta m(p)_{ne-Darcy} = \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{q_{gSC}^2 T}{2 \pi^2 h^2 \bar{\mu}_g} \left( \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2 \left[ \beta_R \left( \frac{1}{r_d} - \frac{1}{r_e} \right) + \beta_d \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_d} \right) \right], \quad (8.40)$$

pa se sukladno obrascu (8.18) može pisati da je ukupni koeficijent ne-Darcyjeva protoka  $D$  jednak:

$$D = \frac{\frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{T}{2 \pi^2 h^2 \bar{\mu}_g} \left( \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2 \left[ \beta_R \left( \frac{1}{r_d} - \frac{1}{r_e} \right) + \beta_d \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_d} \right) \right]}{\frac{T}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}}}, \quad (8.41)$$

odnosno:

$$D = \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{k}{2 \pi h \bar{\mu}_g} \left[ \beta_R \left( \frac{1}{r_d} - \frac{1}{r_e} \right) + \beta_d \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_d} \right) \right], \quad (8.42)$$

iz kojeg se može razlučiti koeficijent ne-Darcyjeva protoka u području neoštećenog ležišta  $D_R$ :

$$D_R = \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{k}{2 \pi h \bar{\mu}_g} \left[ \beta_R \left( \frac{1}{r_d} - \frac{1}{r_e} \right) \right], \quad (8.43)$$

odnosno koeficijent ne-Darcyjeva protoka u području oštećenog ležišta  $D_d$ :

$$D_d = \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{k}{2 \pi h \bar{\mu}_g} \left[ \beta_d \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_d} \right) \right]. \quad (8.44)$$

Golan i Whitson (1995) kvantificirali su utjecaj efekta parcijalne penetracije bušotine u ležište na dodatni gubitak tlaka uslijed visokih brzina protjecanja na način da su u jednadžbi (8.40) zamijenili debljinu ležišta  $h$  sa samo raskrivenim (perforiranim) dijelom ležišta  $h_p$ .

Koeficijent ne-Darcyjeva protoka u području neoštećenog ležišta  $D_R$  tada ima oblik:

$$D_R = \beta_R \frac{M_z \gamma_g p_{SC}}{R T_{SC}} \frac{k h}{2 \pi h_p^2 \bar{\mu}_g} \left( \frac{1}{r_d} - \frac{1}{r_e} \right), \quad (8.45)$$

dok će koeficijent ne-Darcyjeva protoka u području oštećenog ležišta  $D_d$  biti jednak:

$$D_d = \beta_d \frac{M_z \gamma_g p_{SC}}{RT_{SC}} \frac{kh}{2\pi h_p^2 \bar{\mu}_g} \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_d} \right). \quad (8.46)$$

Ukupni koeficijent ne-Darcyjeva protoka  $D$  jednak je:

$$D = D_R + D_d. \quad (8.47)$$

Ukupni gubitak tlaka kao posljedicu visokih brzina protoka plina kroz neoštećeno ležište i pribušotinsku zonu promijenjene propusnosti, može se izraziti kroz slijedeću jednadžbu:

$$\left[ m(\bar{p}_R) - m(p_{wfs}) \right]_{ne-Darcy} = \frac{T}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} q_{gSC} (D q_{gSC}). \quad (8.48)$$

Na kraju, zbrajanjem jednadžbi (8.38) i (8.48), dobiva se izraz za ukupni gubitak tlaka kod poluustaljenog stanja protjecanja kod koje postoji oštećenje pribušotinske zone u radijusu  $r_d$ :

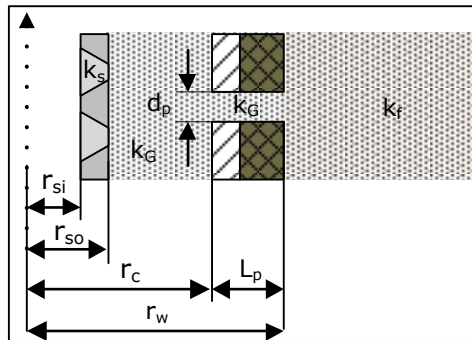
$$m(\bar{p}_R) - m(p_{wfs}) = \frac{T}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} q_{gSC} \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + s_d + (D q_{gSC}) \right], \quad (8.49)$$

a izraz za proizvodnost plinske bušotine pri poluustaljenom stanju protjecanja dobiva svoj konačni oblik:

$$q_{gSC} = \frac{T_{SC}}{p_{SC}} \frac{\pi k h \left[ m(\bar{p}_R) - m(p_{wfs}) \right]}{T \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + s_d + (D q_{gSC}) \right]}. \quad (8.50)$$

## 7.2. PRILOG 2. Gubitak tlaka u perforacijama ispunjenim podupiračem i anularnom sustavu pješčanog zasipa.

Promatra se ustaljeni linearni protok plina kroz perforacijske tunele bušotine ispunjene pijeskom pješčanog zasipa ili podupiračem frakture, ako se radi o frakturiranom ležištu. Pretpostavlja se da je protok jednoliko raspoređen po svim perforacijama.



Slika 65. Shematski prikaz perforacijskog tunela ispunjenog pijeskom i anularnog sustava pješčanog zasipa s koncentrično smještenim filtrom u području perforiranog intervala.

Jednadžba koja opisuje linearno protjecanje fluida iz ležišta/frakture kroz perforacijski tunel ispunjen propusnim medijem u anularni sustav pješčanog zasipa (bušotinu), temelji se na poznatoj Forchheimerovoj jednadžbi (Forchheimer 1901):

$$\frac{dp}{dL_p} = \left( \frac{dp}{dL_p} \right)_{Darcy} + \left( \frac{dp}{dL_p} \right)_{ne-Darcy} \quad (8.51)$$

gdje  $\left( \frac{dp}{dL_p} \right)_{Darcy}$  član jednadžbe koji opisuje gubitak tlaka kao posljedicu laminarnog protjecanja plina kroz perforacijski tunel te je sukladno Darcyjevom zakonu jednak:

$$\left( \frac{dp}{dL_p} \right)_{Darcy} = \frac{\mu_g}{k_G} v_g, \quad (8.52)$$

a  $\left( \frac{dp}{dL_p} \right)_{ne-Darcy}$  član jednadžbe koji opisuje odstupanje od Darcyjeva zakona kao posljedice visoke brzine protoka plina kroz perforacijski tunel i izražava se kao dodatni gubitak tlaka prema obrascu:

$$\left( \frac{dp}{dL_p} \right)_{ne-Darcy} = \beta_G \rho_g v_g^2. \quad (8.53)$$

Duljina perforacijskog tunela jednaka je:



$$L_p = r_w - r_c \cdot \quad (8.54)$$

Budući da je protok plina jednolično raspoređen po svim perforacijama kojih ima  $n_p$ , brzina plina određena je izrazom:

$$v_g = \frac{q_{gSC} B_g}{n_p \left( \frac{D_p^2 \pi}{4} \right)}. \quad (8.55)$$

Uvođenjem jednadžbi (8.52), (8.53), (8.4), (8.55) i (8.6) u jednadžbu (8.51) dobiva se izraz koji opisuje protjecanje kroz perforacijske tunele ispunjene pijeskom u bušotinu:

$$\frac{dp}{dL_p} = \frac{\mu_g}{k_G} \frac{q_{gSC}}{n_p \left( \frac{D_p^2 \pi}{4} \right)} \frac{ZT}{p} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} + \beta_G \frac{p M_z \gamma_g}{ZRT} \left( \frac{q_{gSC}}{n_p \left( \frac{D_p^2 \pi}{4} \right)} \frac{ZT}{p} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2. \quad (8.56)$$

Pomnožimo li izraz (8.56) s  $\frac{2p}{\mu_g Z} dL_p$ :

$$\frac{dp}{dL_p} = \frac{\mu_g}{k} \frac{4q_{gSC}}{n_p D_p^2 \pi} \frac{ZT}{p} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} + \beta_G \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{4^2 q_{gSC}^2}{n_p^2 D_p^4 \pi^2} \frac{ZT}{p} \left( \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2 \left/ \times \frac{2p}{\mu_g Z} dL_p, \right. (8.57)$$

dobivamo;

$$\frac{2p}{\mu_g Z} dp = \frac{8q_{gSC} T}{k_G n_p D_p^2 \pi} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} dL_p + \beta_G \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{32q_{gSC}^2 T}{n_p^2 D_p^4 \pi^2} \left( \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2 \frac{1}{\mu_g} dL_p. \quad (8.58)$$

Izraz (8.58) integriramo kako slijedi;

$$\int_{p_c}^{p_{wfs}} \frac{2p}{\mu_g Z} dp = \frac{8q_{gSC} T}{k_G n_p D_p^2 \pi} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \int_0^{L_p} dL_p + \beta_G \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{32q_{gSC}^2 T}{n_p^2 D_p^4 \pi^2} \left( \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2 \int_0^{L_p} \frac{1}{\mu_g} dL_p. \quad (8.59)$$

Integriranjem i sređivanjem jednadžbe (8.59) unutar naznačenih granica, uvođenjem funkcije pseudotlaka, dobiva se jednadžba gubitka tlaka kroz perforacijske tunele:

$$m(p_{wfs}) - m(p_c) = \frac{8q_{gSC} T}{k_G n_p D_p^2 \pi} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} L_p + \beta_G \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{32q_{gSC}^2 T}{n_p^2 D_p^4 \pi^2} \left( \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2 \frac{1}{\bar{\mu}_g} L_p. \quad (8.60)$$

Ukupni gubitak tlaka kroz ležište, oštećenu zonu i perforacijske tunele može se izračunati sukladno sljedećim obrascu:

$$\begin{aligned} & \left[ m(\bar{p}_R) - m(p_{wfs}) \right] + \left[ m(p_{wfs}) - m(p_c) \right] = \\ & \frac{T}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} q_g \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + s_d + (D q_{gSC}) \right] + \\ & \left[ \frac{8 q_g T}{k_G n_p D_p^2 \pi} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} L_p + \beta_G \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{32 q_{gSC}^2 T}{n_p^2 D_p^4 \pi^2} \left( \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \right)^2 \frac{1}{\bar{\mu}_g} L_p \right] \end{aligned} \quad (8.61)$$

odnosno:

$$\begin{aligned} m(\bar{p}_R) - m(p_c) &= \frac{T}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} q_{gSC} \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + s_d + (D q_{gSC}) \right] + \\ & \frac{T}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} q_{gSC} \left[ \frac{8 k h}{k_G n_p D_p^2} L_p + \beta_G \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{32 k h}{n_p^2 D_p^4 \pi} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{1}{\bar{\mu}_g} L_p q_{gSC} \right] \end{aligned} \quad (8.62)$$

Iz drugog člana izraza (8.62) mogu se razlučiti linearni *skin* uslijed linearnog protjecanja u perforacijama  $s_G$ :

$$s_G = \frac{8 k h}{k_G n_p D_p^2} L_p, \quad (8.63)$$

i ekvivalentni efekt visokih brzina protjecanja fluida u perforacijama  $D_G$ :

$$D_G = \beta_G \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{32 k h}{n_p^2 D_p^4 \pi} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{1}{\bar{\mu}_g} L_p. \quad (8.64)$$

Tako da konačni izraz za ukupni gubitak tlaka kroz ležište, oštećenu zonu i perforacijske tunele ima sljedeći oblik:

$$m(\bar{p}_R) - m(p_c) = \frac{T}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} q_{gSC} \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + (s_d + s_G) + (D_R + D_d + D_G) q_{gSC} \right]. \quad (8.65)$$

Anularni sustav pješčanog zasipa podrazumijeva radijalni sustav protjecanja, gdje je vanjska granica drenaže unutarnji promjer zaštitnih cijevi, anularni prostor ispunjen pijeskom ili podupiračem propusna je sredina ekvivalentna neoštećenom ležištu debljine ekvivalentne vertikalnoj visini filtra, vanjski promjer filtra može se poistovjetiti s radijusom oštećene zone, propusnost filtra propusnošću oštećene zone, a unutarnji promjer filtra radijusom bušotine.

Izraz ukupni gubitak tlaka u anularnom sustavu pješčanog zasipa tada ima sljedeći oblik:

$$m(p_c) - m(p_{wf}) = \frac{T q_{gSC}}{\pi k_G h_{scr}} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \left[ \ln \left( \frac{r_c}{r_{si}} \right) + s_{GP,p} + (D_{GP,p} q_{gSC}) \right], \quad (8.66)$$

gdje je  $s_{GP,p}$  bezdimenzijski *pseudoskin* faktor kao posljedica postavljanja anularnog sustava pješčanog zasipa:

$$s_{GP,p} = \left( \frac{k_G}{k_s} - 1 \right) \ln \left( \frac{r_{so}}{r_{si}} \right), \quad (8.67)$$

odnosno ukupni pseudokoefficient ne-Darcyjeva protoka u anularnom sustavu pješčanog zasipa  $D_{GP,p}$ :

$$D_{GP,p} = \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{k_G}{2\pi h_{scr} \mu_g} \left[ \beta_G \left( \frac{1}{r_{so}} - \frac{1}{r_c} \right) + \beta_{scr} \left( \frac{1}{r_{si}} - \frac{1}{r_{so}} \right) \right]. \quad (8.68)$$

Iz jednadžbe (8.68) mogu se razlučiti pseudokoefficient ne-Darcyjeva protoka u području anularnog prostora ispunjenog pijeskom  $D_{G,p,an}$ :

$$D_{G,p,an} = \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{k_G}{2\pi h_{scr} \mu_g} \left[ \beta_G \left( \frac{1}{r_{so}} - \frac{1}{r_c} \right) \right], \quad (8.69)$$

i pseudokoefficient ne-Darcyjeva protoka filtra pješčanog zasipa  $D_{scr,p}$ :

$$D_{scr,p} = \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{k_G}{2\pi h_{scr} \bar{\mu}_g} \left[ \beta_{scr} \left( \frac{1}{r_{si}} - \frac{1}{r_{so}} \right) \right]. \quad (8.70)$$

Ukupni pseudokoefficient ne-Darcyjeva protoka u anularnom sustavu pješčanog zasipa  $D_{GP,p}$  jednak je:

$$D_{GP,p} = D_{G,p,an} + D_{scr,p}. \quad (8.71)$$

Ukupni gubitak tlaka kroz ležište, oštećenu zonu, perforacijske tunele i anularni sustav pješčanog zasipa, može se izračunati prema sljedećoj jednadžbi:

$$\begin{aligned}
& \left[ m(\bar{p}_R) - m(p_c) \right] + \left[ m(p_c) - m(p_{wf}) \right] = \\
& = \frac{T}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} q_{gSC} \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + (s_d + s_G) + (D_R + D_d + D_G) q_{gSC} \right] + \cdot \quad (8.72) \\
& + \frac{T}{\pi k_G} \frac{q_{gSC}}{h_{scr}} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \left[ \ln \left( \frac{r_c}{r_{si}} \right) + s_{GP,p} + (D_{GP,p} q_{gSC}) \right]
\end{aligned}$$

Uvođenjem izraza (8.67) i (8.68) u jednadžbu (8.72) dobiva se:

$$\begin{aligned}
& \left[ m(\bar{p}_R) - m(p_c) \right] + \left[ m(p_c) - m(p_{wf}) \right] = \\
& \frac{T}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} q_{gSC} \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + (s_d + s_G) + (D_R + D_d + D_G) q_{gSC} \right] + \frac{T}{\pi k_G} \frac{p_{SC}}{h_{scr}} \frac{q_{gSC}}{T_{SC}} \times \\
& \times \left[ \ln \left( \frac{r_c}{r_{si}} \right) + \left( \frac{k_G}{k_s} - 1 \right) \ln \left( \frac{r_{so}}{r_{si}} \right) + \left( \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{k_G}{2 \pi h_{scr} \bar{\mu}_g} \left[ \beta_G \left( \frac{1}{r_{so}} - \frac{1}{r_c} \right) + \beta_{scr} \left( \frac{1}{r_{si}} - \frac{1}{r_{so}} \right) \right] q_{gSC} \right) \right] \\
& \cdot \quad (8.73)
\end{aligned}$$

Jednadžba (8.73) može se preformulirati na sljedeći način:

$$\begin{aligned}
& \left[ m(\bar{p}_R) - m(p_c) \right] + \left[ m(p_c) - m(p_{wf}) \right] = \\
& \frac{T}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} q_{gSC} \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + (s_d + s_G) + (D_R + D_d + D_G) q_{gSC} \right] + \quad (8.74) \\
& \left. \frac{T}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} q_{gSC} \left\{ \frac{k h}{k_G h_{scr}} \left[ \ln \left( \frac{r_c}{r_{si}} \right) + \left( \frac{k_G}{k_s} - 1 \right) \ln \left( \frac{r_{so}}{r_{si}} \right) \right] + \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{k h}{k_G h_{scr}} \left( \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{k_G}{2 \pi h_{scr} \bar{\mu}_g} \left[ \beta_G \left( \frac{1}{r_{so}} - \frac{1}{r_c} \right) + \beta_{scr} \left( \frac{1}{r_{si}} - \frac{1}{r_{so}} \right) \right] q_{gSC} \right) \right\} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left[ m(p_c) - m(p_{wf}) \right] = \\
& = \frac{T}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} q_{gSC} \left\{ \frac{k h}{k_G h_{scr}} \left[ \ln \left( \frac{r_c}{r_{si}} \right) + \left( \frac{k_G}{k_s} - 1 \right) \ln \left( \frac{r_{so}}{r_{si}} \right) \right] + \right. \\
& \quad \left. + \frac{k h}{k_G h_{scr}} \left( \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{k_G}{2 \pi h_{scr} \bar{\mu}_g} \left[ \beta_G \left( \frac{1}{r_{so}} - \frac{1}{r_c} \right) + \beta_{scr} \left( \frac{1}{r_{si}} - \frac{1}{r_{so}} \right) \right] \right) q_{gSC} \right\} = . \\
& = \frac{T}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} q_{gSC} \left\{ \frac{k h}{k_G h_{scr}} \left[ \ln \left( \frac{r_c}{r_{si}} \right) + \left( \frac{k_G}{k_s} - 1 \right) \ln \left( \frac{r_{so}}{r_{si}} \right) \right] + \right. \\
& \quad \left. + \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{k h}{2 \pi h_{scr}^2 \bar{\mu}_g} \left[ \beta_G \left( \frac{1}{r_{so}} - \frac{1}{r_c} \right) + \beta_{scr} \left( \frac{1}{r_{si}} - \frac{1}{r_{so}} \right) \right] q_{gSC} \right\} \\
& \hspace{15em} (8.75)
\end{aligned}$$

Iz jednadžbe (8.75) može se konačno razlučiti  $s_{GP}$ , bezdimenzijski linearni *skin* faktor, kao posljedica postavljanja anularnog sustava pješčanog zasipa:

$$s_{GP} = \frac{k h}{k_G h_{scr}} \left[ \ln \left( \frac{r_c}{r_{si}} \right) + \left( \frac{k_G}{k_s} - 1 \right) \ln \left( \frac{r_{so}}{r_{si}} \right) \right], \quad (8.76)$$

i ekvivalentni efekt visokih brzina protjecanja fluida u sustavu anularnog pješčanog zasipa  $D_{GP}$ :

$$D_{GP} = \frac{M_z \gamma_g}{R} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} \frac{k h}{2 \pi h_{scr}^2 \bar{\mu}_g} \left[ \beta_G \left( \frac{1}{r_{so}} - \frac{1}{r_c} \right) + \beta_{scr} \left( \frac{1}{r_{si}} - \frac{1}{r_{so}} \right) \right]. \quad (8.77)$$

Konačni izraz za ukupni gubitak tlaka kroz ležište, oštećenu zonu, perforacijske tunele i anularni sustav pješčanog zasipa ima sljedeći oblik:

$$m(\bar{p}_R) - m(p_{wf}) = \frac{T}{\pi k h} \frac{p_{SC}}{T_{SC}} q_{gSC} \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + (s_d + s_G + s_{GP}) + (D_R + D_d + D_G + D_{GP}) q_{gSC} \right]. \quad (8.78)$$

### 7.3. PRILOG 3. Rezultati proračuna proizvodnog potencijala ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir

Tablica 57. Rezultati iterativnog proračuna *UFD* modela za dinamički tlak  $p_{wf} = 99,70 \text{ bar}$  ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

$N_{re,pretp}$	$k_{ref} \text{ (mD)}$	$V_R \text{ (m}^3\text{)}$	$V_{prop-2krila} \text{ (m}^3\text{)}$	$N_{prop}$	$C_{ID,opt}$	$J_{ID,max}$	$x_{f,opt} \text{ (m)}$	$w_{f,opt} \text{ (m)}$	$J_{ID}$	$P_{sred} \text{ (bar)}$	$\mu_{sred} \text{ (mPa s)}$	$Z_{sred}$	$q_{gSC,r} \text{ (m}^3\text{/dan)}$	$p_{wf} \text{ (bar)}$	
0	180 000	1 139 020	2,131	0,111479	1,6041	0,441794	70,09	0,003775	0,43789	122,78	0,014921	0,829865	245 292	99,70	
1,0000	90 000	1 139 020	2,131	0,055740	1,6000	0,410926	49,62	0,005331	0,40617	122,78	0,014921	0,829865	227 522	99,70	
2,0000	60 000	1 139 020	2,131	0,037160	1,6000	0,379325	40,52	0,006529	0,37437	122,78	0,014921	0,829865	209 709	99,70	
3,0000	45 000	1 139 020	2,131	0,027870	1,6000	0,359699	35,09	0,007539	0,35456	122,78	0,014921	0,829865	198 612	99,70	
3,4742	40 230	1 139 020	2,131	0,024916	1,6000	0,352594	33,18	0,007974	0,347375	122,78	0,014921	0,829865	194 587	99,70	
$q_{gSC,r} \text{ (m}^3\text{/dan)}$	$p_{wf} \text{ (bar)}$	$\mu_{g,wf} \text{ (mPa s)}$	$Z_{g,wf}$	$B_{g,wf} \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}$	$\rho_{g,wf} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$v_{g,wf} \text{ (m/s)}$	F	$\beta' \text{ (1/m)}$	$N_{Re,izračunati}$	Pogreška (%)	$S_{f,uk}$	FOI	$S_{ff}$	$S_{ck,w}$	$S_{ck,k}$
245 292	99,70	0,013939	0,848919	0,008985	75,948347	0,827223	1,258925	51024	41,3953	#DIV/0!	-4,896203	2,741	0,006723	0,000000	0,013447
227 522	99,70	0,013939	0,848919	0,008985	75,948347	0,543255	1,258925	51024	13,5926	1259,261172	-4,717850	2,543	0,009496	0,000000	0,018993
209 709	99,70	0,013939	0,848919	0,008985	75,948347	0,408838	1,258925	51024	6,8196	240,979656	-4,508715	2,344	0,011630	0,000000	0,023261
198 612	99,70	0,013939	0,848919	0,008985	75,948347	0,335329	1,258925	51024	4,1951	39,835825	-4,359476	2,220	0,013430	0,000000	0,026859
194 587	99,70	0,013939	0,848919	0,008985	75,948347	0,310635	1,258925	51024	3,4743	0,001019	-4,301135	2,175	0,014204	0,000000	0,028407

Tablica 58. Rezultati iterativnog proračuna *UFD* modela za teoretski optimalnu poluduljinu frakture 24,71 m i dinamički tlak  $p_{wf} = 99,70 \text{ bar}$  u ležištu PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir.

$N_{re,pretp}$	$k_{ref} \text{ (mD)}$	$V_R \text{ (m}^3\text{)}$	$V_{prop-2krila} \text{ (m}^3\text{)}$	$N_{prop}$	$C_{ID,opt}$	$J_{ID,max}$	$x_{f,opt} \text{ (m)}$	$w_{f,opt} \text{ (m)}$	$J_{ID}$	$P_{sred} \text{ (bar)}$	$\mu_{sred} \text{ (mPa s)}$	$Z_{sred}$	$q_{gSC} \text{ (m}^3\text{/dan)}$	$p_{wf} \text{ (bar)}$	
0	180 000	2 310 013	1,561	0,081618	1,6000	0,445861	60,05	0,001590	0,44123	122,78	0,014921	0,829865	247 161	99,70	
1,0000	90 000	2 310 013	1,561	0,040809	1,6000	0,386186	42,46	0,002249	0,38128	122,78	0,014921	0,829865	213 581	99,70	
2,0000	60 000	2 310 013	1,561	0,027206	1,6000	0,358146	34,67	0,002755	0,35299	122,78	0,014921	0,829865	197 733	99,70	
3,0000	45 000	2 310 013	1,561	0,020404	1,6000	0,340599	30,02	0,003181	0,33522	122,78	0,014921	0,829865	187 780	99,70	
4,9047	30 484	2 310 013	1,561	0,013822	1,6000	0,319414	24,71	0,003865	0,31368	122,78	0,014921	0,829865	175 714	99,70	
$q_{gSC,r} \text{ (m}^3\text{/dan)}$	$p_{wf} \text{ (bar)}$	$\mu_{g,wf} \text{ (mPa s)}$	$Z_{g,wf}$	$B_{g,wf} \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}$	$\rho_{g,wf} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$v_{g,wf} \text{ (m/s)}$	F	$\beta' \text{ (1/m)}$	$N_{Re,izračunati}$	Pogreška (%)	$S_{f,uk}$	FOI	$S_{ff}$	$S_{ck,w}$	$S_{ck,k}$
247 161	99,70	0,013939	0,848919	0,008985	75,948347	1,978165	1,258925	51024	98,9900	#DIV/0!	-4,913473	2,762	0,007848	0,000000	0,015695
213 581	99,70	0,013939	0,848919	0,008985	75,948347	1,208735	1,258925	51024	30,2434	2924,336064	-4,557147	2,387	0,011098	0,000000	0,022197
197 733	99,70	0,013939	0,848919	0,008985	75,948347	0,913694	1,258925	51024	15,2408	662,041187	-4,346932	2,210	0,013593	0,000000	0,027185
187 780	99,70	0,013939	0,848919	0,008985	75,948347	0,751454	1,258925	51024	9,4009	213,364772	-4,196782	2,098	0,015695	0,000000	0,031391
175 714	99,70	0,013939	0,848919	0,008985	75,948347	0,578748	1,258925	51024	4,9048	0,001426	-3,991932	1,964	0,019070	0,000000	0,038139

Tablica 59. Rezultati iterativnog proračuna proizvodnosti ležišta PLQ-F istražne bušotine SJ – 1 Dir kod teoretski optimalnih parametara frakture prema konvencionalnom *UFD* modelu.

$p_{wf}$ (bar)	$N_{re,pretp}$	$k_{ef}$ (mD)	$V_R$ (m <sup>3</sup> )	$V_{prop-2knl}$ (m <sup>3</sup> )	$N_{prop}$	$C_D$	$J_{D,f}$	$x_{lopt}$ (m)	$w_{lopt}$ (m)	$J_D$	$p_{sred}$ (bar)	$\mu_{sred}$ (mPa s)	$Z_{sred}$	$q_{gSC}$ (m <sup>3</sup> /dan)	$p_{wf}$ (bar)	
145,87	0,0000	180 000	1 139 020	2,131	0,111479	7,1588	0,427685	33,18	0,007974	0,420031	145,87	0,015969	0,819486	0	145,87	
120,00	2,5447	50 780	1 139 020	2,131	0,031450	2,0196	0,366957	33,18	0,007974	0,361307	132,93	0,015348	0,824272	120 174	120,00	
99,70	3,4743	40 230	1 139 020	2,131	0,024916	1,6000	0,352609	33,18	0,007974	0,347390	122,78	0,014921	0,829865	194 596	99,70	
60,00	4,7235	31 449	1 139 020	2,131	0,019477	1,2508	0,336893	33,18	0,007974	0,332125	102,93	0,014067	0,845964	301 827	60,00	
40,00	5,1417	29 308	1 139 020	2,131	0,018151	1,1656	0,332330	33,18	0,007974	0,327690	92,93	0,013640	0,856328	337 723	40,00	
20,00	5,4560	27 881	1 139 020	2,131	0,017268	1,1089	0,329094	33,18	0,007974	0,324543	82,93	0,013216	0,868083	361 320	20,00	
0,00	5,6053	27 251	1 139 020	2,131	0,016877	1,0838	0,327609	33,18	0,007974	0,323099	72,93	0,012848	0,881086	371 540	0,00	
$q_{gSC}$ (m <sup>3</sup> /dan)	$p_{wf}$ (bar)	$\mu_{g,wf}$ (mPa s)	$Z_{g,wf}$	$B_{g,wf}$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	$\rho_{g,wf}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$v_{g,wf}$ (m/s)	F	$\beta'$ (1/m)	$N_{Re,izračunati}$	Pogreška (%)	$S_{f,uk}$	FOI	$S_{if}$	$S_{ck,w}$	$S_{ck,k}$	$S_f$
0	145,87	0,015969	0,819486	0,005947	114,743702	0,000000	1,258925	51024	0,0000		-4,559306	2,629	0,014204	0,000000	0,028407	-4,841703
120 174	120,00	0,014836	0,831183	0,007322	93,203902	0,156326	1,258925	51024	2,5447	0,000086	-4,412143	2,262	0,014204	0,000000	0,028407	-4,454754
194 596	99,70	0,013939	0,848919	0,008985	75,948347	0,310648	1,258925	51024	3,4743	0,001507	-4,301260	2,175	0,014204	0,000000	0,028407	-4,343871
301 827	60,00	0,012432	0,898117	0,015691	43,489970	0,841441	1,258925	51024	4,7235	0,001063	-4,168953	2,079	0,014204	0,000000	0,028407	-4,211564
337 723	40,00	0,011909	0,929275	0,024153	28,253860	1,449229	1,258925	51024	5,1416	0,002821	-4,128202	2,051	0,014204	0,000000	0,028407	-4,170812
361 320	20,00	0,011422	0,962934	0,048849	13,969949	3,135821	1,258925	51024	5,4560	0,000464	-4,098611	2,032	0,014204	0,000000	0,028407	-4,141221
371 540	0,00	0,011174	0,998184	1,050146	0,649836	69,319623	1,258925	51024	5,6052	0,000450	-4,084844	2,023	0,014204	0,000000	0,028407	-4,127455

Tablica 60. Rezultati iterativnog proračuna proizvodnosti ležišta PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir prema *UFD* modelu za optimalnu poluduljinu frakture

$x_{f,opt} = 24,74\text{ m}$ , optimalnu širinu frakture  $w_{opt} = 3,87\text{ mm}$  i srednju visinu frakture  $h_{ef,f} = 7,86\text{ m}$ .

$N_{re,pretp}$	$k_{i,ef}(\text{mD})$	$V_R (\text{m}^3)$	$V_{prop-2krila} (\text{m}^3)$	$N_{prop}$	$C_D$	$J_{D,f}$	$x_{f,opt} (\text{m})$	$w_{f,opt} (\text{m})$	$J_D$	$P_{sred} (\text{bar})$	$\mu_{sred} (\text{mPa s})$	$Z_{sred}$	$q_{gSC} (\text{m}^3/\text{dan})$	$p_{wf} (\text{bar})$
0,0000	180 000	2 310 013	1,561	0,081618	9,4492	0,386759	24,74	0,003869	0,378395	145,87	0,015969	0,819486	0	145,87
3,6238	38 929	2 310 013	1,561	0,017652	2,0436	0,331844	24,74	0,003869	0,325668	132,93	0,015348	0,824272	108 320	120,00
4,9028	30 494	2 310 013	1,561	0,013827	1,6008	0,319555	24,74	0,003869	0,313823	122,78	0,014921	0,829865	175 793	99,70
6,6214	23 618	2 310 013	1,561	0,010709	1,2398	0,306098	24,74	0,003869	0,300835	102,93	0,014067	0,845964	273 392	60,00
7,1971	21 959	2 310 013	1,561	0,009957	1,1528	0,302189	24,74	0,003869	0,297059	92,93	0,013640	0,856328	306 154	40,00
7,6298	20 858	2 310 013	1,561	0,009458	1,0949	0,299415	24,74	0,003869	0,294377	82,93	0,013216	0,868083	327 736	20,00
7,8354	20 373	2 310 013	1,561	0,009238	1,0695	0,298142	24,74	0,003869	0,293147	72,93	0,012848	0,881086	337 097	0,00

$q_{gSC} (\text{m}^3/\text{dan})$	$p_{wf} (\text{bar})$	$\mu_{g,wf} (\text{mPa s})$	$Z_{g,wf}$	$B_{g,wf} (\text{m}^3/\text{m}^3)$	$\rho_{g,wf} (\text{kg}/\text{m}^3)$	$v_{g,wf} (\text{m}/\text{s})$	F	$\beta' (1/\text{m})$	$N_{Re,izračunati}$	Pogreška (%)	$S_{f,uk}$	FOI	$S_f$	$S_{ck,w}$	$S_{ck,k}$	$S_f$
0	145,87	0,015969	0,819486	0,005947	114,743702	0,000000	1,258925	51024	0,0000		-4,236753	2,369	0,019051	0,000000	0,038101	-4,594279
108 320	120,00	0,014836	0,831183	0,007322	93,203902	0,290383	1,258925	51024	3,6237	0,000504	-4,109255	2,039	0,019051	0,000000	0,038101	-4,166407
175 793	99,70	0,013939	0,848919	0,008985	75,948347	0,578334	1,258925	51024	4,9028	0,000320	-3,993361	1,964	0,019051	0,000000	0,038101	-4,050513
273 392	60,00	0,012432	0,898117	0,015691	43,489970	1,570698	1,258925	51024	6,6215	0,001343	-3,855788	1,883	0,019051	0,000000	0,038101	-3,912940
306 154	40,00	0,011909	0,929275	0,024153	28,253860	2,707439	1,258925	51024	7,1970	0,000192	-3,813531	1,860	0,019051	0,000000	0,038101	-3,870684
327 736	20,00	0,011422	0,962934	0,048849	13,969949	5,861731	1,258925	51024	7,6298	0,000387	-3,782869	1,843	0,019051	0,000000	0,038101	-3,840021
337 097	0,00	0,011174	0,998184	1,050146	0,649836	129,612767	1,258925	51024	7,8352	0,003601	-3,768610	1,835	0,019051	0,000000	0,038101	-3,825762



#### 7.4. PRILOG 4. Rezultati TLA analize i izračuna distribucije efektivnih propusnosti šireg područja ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir

Tablica 61. Rezultati TLA analize i izračuna distribucije efektivnih propusnosti šireg područja ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir

Litologija	Ležište	Vrh proslojka ( m TVD)	Debljina proslojka ( cm TVD)	Propusnost po Timur-Coatsu ( mD )	Moćnost proslojka po Timur-Coatsu ( mD m )	Porozitet proslojka (dio jedinice)	Zasićenje vodom (dio jedinice)	Efektivna propusnost proslojka za plin ( mD )	Moćnost proslojka ( mD m )
SILT	PLQ - E1	1298,15	1,00	0,04	0,00	0,159	0,7301	0,01	0,000
ŠEJL	PLQ - E1	1298,16	5,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - E1	1298,21	2,00	19,45	0,39	0,251	0,8434	6,43	0,129
ŠEJL	PLQ - E1	1298,23	1,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - E1	1298,24	13,00	18,68	2,43	0,254	0,8936	6,18	0,803
ŠEJL	PLQ - E1	1298,37	3,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1298,40	2,00	0,01	0,00	0,154	0,8018	0,00	0,000
ŠEJL	PLQ - E1	1298,42	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1298,44	2,00	0,00	0,00	0,152	0,7991	0,00	0,000
ŠEJL	PLQ - E1	1298,46	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1298,48	1,00	0,28	0,00	0,174	0,8099	0,09	0,001
ŠEJL	PLQ - E1	1298,49	4,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - E1	1298,53	2,00	5,41	0,11	0,212	0,842	1,79	0,036
ŠEJL	PLQ - E1	1298,55	1,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - E1	1298,56	4,00	36,78	1,47	0,263	0,8968	12,16	0,486
ŠEJL	PLQ - E1	1298,60	5,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - E1	1298,65	3,00	24,62	0,74	0,256	0,8895	8,14	0,244
ŠEJL	PLQ - E1	1298,68	7,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - E1	1298,75	3,00	50,42	1,51	0,260	0,8827	16,67	0,500
ŠEJL	PLQ - E1	1298,78	6,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000

PIJESAK	PLQ - E1	1298,84	5,00	21,05	1,05	0,258	0,9177	6,96	0,348
ŠEJL	PLQ - E1	1298,89	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - E1	1298,91	2,00	28,23	0,56	0,259	0,9222	9,33	0,187
ŠEJL	PLQ - E1	1298,93	3,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - E1	1298,96	2,00	10,53	0,21	0,235	0,9059	3,48	0,070
ŠEJL	PLQ - E1	1298,98	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - E1	1299,00	5,00	23,23	1,16	0,253	0,9209	7,68	0,384
ŠEJL	PLQ - E1	1299,05	6,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - E1	1299,11	2,00	13,47	0,27	0,227	0,8761	4,45	0,089
ŠEJL	PLQ - E1	1299,13	3,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - E1	1299,16	3,00	37,12	1,11	0,257	0,8785	12,27	0,368
ŠEJL	PLQ - E1	1299,19	3,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1299,22	2,00	0,73	0,01	0,169	0,779	0,24	0,005
ŠEJL	PLQ - E1	1299,24	6,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - E1	1299,30	7,00	62,92	4,40	0,261	0,8782	20,80	1,456
ŠEJL	PLQ - E1	1299,37	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1299,39	2,00	0,62	0,01	0,166	0,8099	0,20	0,004
ŠEJL	PLQ - E1	1299,41	3,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1299,44	1,00	2,19	0,02	0,186	0,8238	0,72	0,007
ŠEJL	PLQ - E1	1299,45	0,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - E1	1299,45	5,00	47,62	2,38	0,264	0,8945	15,74	0,787
ŠEJL	PLQ - E1	1299,50	21,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1299,71	2,00	0,06	0,00	0,145	0,8109	0,02	0,000
ŠEJL	PLQ - E1	1299,73	16,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1299,89	3,00	0,00	0,00	0,144	0,7334	0,00	0,000
ŠEJL	PLQ - E1	1299,92	6,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - E1	1299,98	9,00	5,38	0,48	0,216	0,853	1,78	0,160
ŠEJL	PLQ - E1	1300,07	4,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - E1	1300,11	5,00	10,93	0,55	0,263	0,885	3,61	0,181

ŠEJL	PLQ - E1	1300,16	7,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - E1	1300,23	10,00	48,47	4,85	0,267	0,8918	16,02	1,602
ŠEJL	PLQ - E1	1300,33	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - E1	1300,35	4,00	45,34	1,81	0,269	0,8837	14,99	0,600
ŠEJL	PLQ - E1	1300,39	6,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - E1	1300,45	7,00	34,72	2,43	0,277	0,856	11,48	0,804
ŠEJL	PLQ - E1	1300,52	8,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1300,60	0,00	0,03	0,00	0,171	0,7788	0,01	0,000
ŠEJL	PLQ - E1	1300,60	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - E1	1300,62	4,00	10,89	0,44	0,278	0,8496	3,60	0,144
ŠEJL	PLQ - E1	1300,66	1,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1300,67	4,00	0,10	0,00	0,232	0,7891	0,03	0,001
ŠEJL	PLQ - E1	1300,71	17,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - E1	1300,88	2,00	4,64	0,09	0,231	0,7883	1,53	0,031
ŠEJL	PLQ - E1	1300,90	5,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1300,95	3,00	2,74	0,08	0,223	0,8142	0,91	0,027
ŠEJL	PLQ - E1	1300,98	4,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - E1	1301,02	6,00	8,10	0,49	0,244	0,8645	2,68	0,161
ŠEJL	PLQ - E1	1301,08	10,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1301,18	2,00	1,02	0,02	0,207	0,821	0,34	0,007
ŠEJL	PLQ - E1	1301,20	1,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1301,21	3,00	1,38	0,04	0,217	0,8287	0,46	0,014
ŠEJL	PLQ - E1	1301,24	1,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1301,25	2,00	0,11	0,00	0,146	0,7645	0,04	0,001
ŠEJL	PLQ - E1	1301,27	7,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1301,34	2,00	0,00	0,00	0,180	0,7436	0,00	0,000
ŠEJL	PLQ - E1	1301,36	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - E1	1301,38	7,00	27,13	1,90	0,275	0,7881	8,97	0,628
ŠEJL	PLQ - E1	1301,45	4,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000

PRLJAVI PIJESAK	PLQ - E1	1301,49	2,00	5,87	0,12	0,229	0,7454	1,94	0,039
ŠEJL	PLQ - E1	1301,51	4,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - E1	1301,55	6,00	35,36	2,12	0,278	0,8105	11,69	0,701
ŠEJL	PLQ - E1	1301,61	1,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1301,62	4,00	0,05	0,00	0,145	0,7636	0,02	0,001
ŠEJL	PLQ - E1	1301,66	10,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1301,76	3,00	0,14	0,00	0,164	0,765	0,05	0,001
ŠEJL	PLQ - E1	1301,79	14,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1301,93	1,00	0,19	0,00	0,142	0,6534	0,06	0,001
ŠEJL	PLQ - E1	1301,94	30,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - E1	1302,24	4,00	0,51	0,02	0,205	0,7662	0,17	0,007
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1302,28	5,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1302,33	4,00	0,07	0,00	0,156	0,7682	0,02	0,001
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1302,37	8,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1302,45	3,00	1,53	0,05	0,217	0,7059	0,51	0,015
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1302,48	6,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - Int_E1_F	1302,54	4,00	6,78	0,27	0,227	0,6457	2,24	0,090
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1302,58	4,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1302,62	5,00	0,44	0,02	0,187	0,6248	0,15	0,007
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1302,67	13,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1302,80	4,00	0,29	0,01	0,150	0,5899	0,10	0,004
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1302,84	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - Int_E1_F	1302,86	2,00	40,16	0,80	0,242	0,6367	13,28	0,266
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1302,88	8,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1302,96	4,00	0,06	0,00	0,150	0,6049	0,02	0,001
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,00	13,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1303,13	4,00	2,58	0,10	0,205	0,66	0,85	0,034
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,17	12,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1303,29	3,00	0,31	0,01	0,194	0,6684	0,10	0,003

ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,32	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1303,34	2,00	0,00	0,00	0,153	0,6427	0,00	0,000
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,36	6,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1303,42	2,00	0,05	0,00	0,156	0,605	0,02	0,000
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,44	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1303,46	3,00	0,28	0,01	0,184	0,5994	0,09	0,003
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,49	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1303,51	1,00	0,55	0,01	0,201	0,6001	0,18	0,002
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,52	8,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1303,60	2,00	0,01	0,00	0,166	0,5884	0,00	0,000
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,62	1,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - Int_E1_F	1303,63	3,00	22,49	0,67	0,276	0,6336	7,44	0,223
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,66	7,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1303,73	8,00	0,02	0,00	0,144	0,5469	0,01	0,000
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,81	11,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - Int_E1_F	1303,92	3,00	3,59	0,11	0,226	0,698	1,19	0,036
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,95	20,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - Int_E1_F	1304,15	8,00	32,72	2,62	0,268	0,5781	10,82	0,865
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,23	8,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,31	5,00	1,72	0,09	0,194	0,7824	0,57	0,028
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,36	10,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,46	3,00	0,04	0,00	0,166	0,7301	0,01	0,000
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,49	1,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,50	2,00	0,05	0,00	0,156	0,7261	0,02	0,000
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,52	5,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,57	1,00	0,06	0,00	0,128	0,6876	0,02	0,000
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,58	5,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,63	1,00	0,07	0,00	0,126	0,6879	0,02	0,000
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,64	4,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000

SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,68	2,00	0,05	0,00	0,136	0,6911	0,02	0,000
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,70	5,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,75	3,00	0,03	0,00	0,161	0,6977	0,01	0,000
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,78	3,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,81	3,00	2,59	0,08	0,207	0,7576	0,86	0,026
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,84	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - Int_E1_F	1304,86	3,00	7,37	0,22	0,232	0,8084	2,44	0,073
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,89	1,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,90	1,00	0,02	0,00	0,146	0,7399	0,01	0,000
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,91	8,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,99	7,00	0,01	0,00	0,139	0,7301	0,00	0,000
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1305,06	9,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1305,15	6,00	0,71	0,04	0,180	0,7738	0,23	0,014
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1305,21	3,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - Int_E1_F	1305,24	2,00	0,01	0,00	0,169	0,7702	0,00	0,000
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1305,26	11,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1305,37	4,00	0,05	0,002	0,159	0,762	0,02	0,001
ŠEJL	PLQ - F	1305,41	7,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1305,48	2,00	7,64	0,153	0,214	0,5792	2,53	0,051
ŠEJL	PLQ - F	1305,50	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1305,52	2,00	0,74	0,015	0,155	0,5257	0,24	0,005
ŠEJL	PLQ - F	1305,54	7,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1305,61	4,00	10,77	0,431	0,237	0,6223	3,56	0,142
ŠEJL	PLQ - F	1305,65	4,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1305,69	6,00	17,20	1,032	0,258	0,7697	5,69	0,341
ŠEJL	PLQ - F	1305,75	9,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1305,84	7,00	31,91	2,234	0,264	0,7133	10,55	0,738
ŠEJL	PLQ - F	1305,91	6,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1305,97	6,00	25,50	1,530	0,259	0,7221	8,43	0,506

ŠEJL	PLQ - F	1306,03	6,00		0,000	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1306,09	3,00	0,58	0,02	0,157	0,7488	0,19	0,006
ŠEJL	PLQ - F	1306,12	1,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1306,13	4,00	0,71	0,028	0,158	0,7729	0,24	0,009
ŠEJL	PLQ - F	1306,17	5,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1306,22	2,00	0,30	0,006	0,150	0,7442	0,10	0,002
ŠEJL	PLQ - F	1306,24	11,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1306,35	2,00	28,71	0,574	0,256	0,7807	9,49	0,190
ŠEJL	PLQ - F	1306,37	1,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1306,38	2,00	4,81	0,096	0,221	0,768	1,59	0,032
ŠEJL	PLQ - F	1306,40	3,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1306,43	5,00	0,18	0,009	0,187	0,7314	0,06	0,003
ŠEJL	PLQ - F	1306,48	8,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1306,56	7,00	10,00	0,700	0,212	0,6965	3,31	0,231
ŠEJL	PLQ - F	1306,63	7,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1306,70	6,00	17,41	1,044	0,261	0,8571	5,75	0,345
ŠEJL	PLQ - F	1306,76	8,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1306,84	5,00	0,01	0,000	0,150	0,7364	0,00	0,000
ŠEJL	PLQ - F	1306,89	5,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1306,94	4,00	6,93	0,277	0,216	0,704	2,29	0,092
ŠEJL	PLQ - F	1306,98	4,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1307,02	1,00	0,65	0,006	0,159	0,704	0,21	0,002
ŠEJL	PLQ - F	1307,03	3,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1307,06	8,00	53,05	4,244	0,255	0,7261	17,54	1,403
ŠEJL	PLQ - F	1307,14	13,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1307,27	5,00	24,18	1,209	0,266	0,8377	7,99	0,400
ŠEJL	PLQ - F	1307,32	1,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1307,33	7,00	3,57	0,250	0,218	0,796	1,18	0,083
ŠEJL	PLQ - F	1307,40	8,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000

<b>PIJESAK</b>	<b>PLQ - F</b>	1307,48	31,00	48,69	15,094	0,272	0,7485	16,10	4,990
ŠEJL	<b>PLQ - F</b>	1307,79	3,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	<b>PLQ - F</b>	1307,82	1,00	1,68	0,017	0,206	0,636	0,56	0,006
ŠEJL	<b>PLQ - F</b>	1307,83	3,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	<b>PLQ - F</b>	1307,86	4,00	0,36	0,014	0,187	0,682	0,12	0,005
ŠEJL	<b>PLQ - F</b>	1307,90	8,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	<b>PLQ - F</b>	1307,98	3,00	0,01	0,000	0,150	0,6401	0,00	0,000
ŠEJL	<b>PLQ - F</b>	1308,01	16,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	<b>PLQ - F</b>	1308,17	5,00	1,47	0,073	0,203	0,6452	0,49	0,024
ŠEJL	<b>PLQ - F</b>	1308,22	6,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	<b>PLQ - F</b>	1308,28	5,00	0,00	0,000	0,146	0,6152	0,00	0,000
ŠEJL	<b>PLQ - F</b>	1308,33	11,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
<b>PIJESAK</b>	<b>PLQ - F</b>	1308,44	3,00	23,56	0,707	0,259	0,742	7,79	0,234
ŠEJL	<b>PLQ - F</b>	1308,47	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
<b>PIJESAK</b>	<b>PLQ - F</b>	1308,49	5,00	27,45	1,372	0,250	0,7592	9,07	0,454
ŠEJL	<b>PLQ - F</b>	1308,54	12,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	<b>PLQ - F</b>	1308,66	2,00	0,14	0,003	0,147	0,7128	0,04	0,001
ŠEJL	<b>PLQ - F</b>	1308,68	6,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	<b>PLQ - F</b>	1308,74	2,00	0,13	0,003	0,151	0,6242	0,04	0,001
ŠEJL	<b>PLQ - F</b>	1308,76	13,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
<b>PIJESAK</b>	<b>PLQ - F</b>	1308,89	4,00	88,87	3,555	0,262	0,6924	29,38	1,175
ŠEJL	<b>PLQ - F</b>	1308,93	1,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	<b>PLQ - F</b>	1308,94	4,00	0,21	0,008	0,152	0,6142	0,07	0,003
ŠEJL	<b>PLQ - F</b>	1308,98	9,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
<b>NEKONSOLIDIRANI</b>	<b>PLQ - F</b>	1309,07	17,00	235,20	39,984	0,266	0,593	77,75	13,218
ŠEJL	<b>PLQ - F</b>	1309,24	8,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
<b>PIJESAK</b>	<b>PLQ - F</b>	1309,32	3,00	134,44	4,033	0,264	0,6897	44,44	1,333
ŠEJL	<b>PLQ - F</b>	1309,35	6,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
<b>PRLJAVI PIJESAK</b>	<b>PLQ - F</b>	1309,41	1,00	8,72	0,087	0,202	0,6456	2,88	0,029



ŠEJL	PLQ - F	1309,42	3,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1309,45	0,00	0,09	0,000	0,142	0,6151	0,03	0,000
ŠEJL	PLQ - F	1309,45	11,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1309,56	4,00	50,19	2,007	0,256	0,8561	16,59	0,664
ŠEJL	PLQ - F	1309,60	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1309,62	6,00	15,20	0,912	0,226	0,7658	5,03	0,302
ŠEJL	PLQ - F	1309,68	5,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1309,73	7,00	70,14	4,910	0,260	0,8263	23,19	1,623
ŠEJL	PLQ - F	1309,80	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1309,82	3,00	0,78	0,024	0,163	0,764	0,26	0,008
ŠEJL	PLQ - F	1309,85	12,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1309,97	3,00	47,31	1,419	0,264	0,8571	15,64	0,469
ŠEJL	PLQ - F	1310,00	5,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1310,05	2,00	0,48	0,010	0,169	0,6543	0,16	0,003
ŠEJL	PLQ - F	1310,07	13,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1310,20	6,00	47,50	2,850	0,276	0,6218	15,70	0,942
ŠEJL	PLQ - F	1310,26	9,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
<b>NEKONSOLIDIRANI</b>	PLQ - F	1310,35	32,00	181,75	58,161	0,288	0,5962	60,09	19,227
ŠEJL	PLQ - F	1310,67	3,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1310,70	4,00	126,43	5,057	0,293	0,593	41,80	1,672
ŠEJL	PLQ - F	1310,74	8,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1310,82	5,00	108,17	5,408	0,279	0,6584	35,76	1,788
ŠEJL	PLQ - F	1310,87	8,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1310,95	6,00	92,82	5,569	0,267	0,8489	30,68	1,841
ŠEJL	PLQ - F	1311,01	8,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1311,09	1,00	2,20	0,022	0,165	0,7699	0,73	0,007
ŠEJL	PLQ - F	1311,10	5,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1311,15	6,00	83,41	5,004	0,262	0,8636	27,57	1,654
ŠEJL	PLQ - F	1311,21	1,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000

PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1311,22	6,00	4,59	0,276	0,201	0,7951	1,52	0,091
ŠEJL	PLQ - F	1311,28	19,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1311,47	3,00	10,43	0,313	0,193	0,6814	3,45	0,103
ŠEJL	PLQ - F	1311,50	3,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1311,53	3,00	11,13	0,334	0,215	0,7428	3,68	0,110
ŠEJL	PLQ - F	1311,56	6,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1311,62	3,00	5,44	0,163	0,208	0,7893	1,80	0,054
ŠEJL	PLQ - F	1311,65	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1311,67	3,00	0,23	0,007	0,168	0,7638	0,08	0,002
ŠEJL	PLQ - F	1311,70	6,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1311,76	6,00	23,00	1,380	0,267	0,7595	7,60	0,456
ŠEJL	PLQ - F	1311,82	16,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1311,98	6,00	30,72	1,843	0,262	0,6943	10,16	0,609
ŠEJL	PLQ - F	1312,04	9,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1312,13	3,00	46,66	1,400	0,266	0,6877	15,42	0,463
ŠEJL	PLQ - F	1312,16	10,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1312,26	5,00	0,00	0,000	0,141	0,7252	0,00	0,000
ŠEJL	PLQ - F	1312,31	22,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1312,53	7,00	9,29	0,650	0,232	0,6884	3,07	0,215
ŠEJL	PLQ - F	1312,60	1,00		0,000	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1312,61	4,00	0,18	0,007	0,178	0,7827	0,06	0,002
ŠEJL	PLQ - F	1312,65	19,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1312,84	5,00	4,06	0,203	0,222	0,6708	1,34	0,067
ŠEJL	PLQ - F	1312,89	7,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1312,96	8,00	0,59	0,047	0,170	0,6325	0,19	0,016
ŠEJL	PLQ - F	1313,04	1,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1313,05	1,00	1,16	0,012	0,170	0,7083	0,38	0,004
ŠEJL	PLQ - F	1313,06	4,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1313,10	11,00	38,26	4,209	0,178	0,8022	12,65	1,391

ŠEJL	PLQ - F	1313,21	16,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1313,37	21,00	39,16	8,223	0,241	0,828	12,94	2,718
ŠEJL	PLQ - F	1313,58	9,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1313,67	2,00	1,25	0,025	0,174	0,7781	0,41	0,008
ŠEJL	PLQ - F	1313,69	3,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1313,72	2,00	4,94	0,099	0,212	0,7956	1,63	0,033
ŠEJL	PLQ - F	1313,74	7,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1313,81	1,00	46,46	0,465	0,269	0,7232	15,36	0,154
ŠEJL	PLQ - F	1313,82	6,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1313,88	6,00	12,76	0,766	0,209	0,7023	4,22	0,253
ŠEJL	PLQ - F	1313,94	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ - F	1313,96	7,00	18,83	1,318	0,232	0,8065	6,22	0,436
ŠEJL	PLQ - F	1314,03	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1314,05	2,00	2,86	0,057	0,205	0,8079	0,95	0,019
ŠEJL	PLQ - F	1314,07	5,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ - F	1314,12	3,00	0,05	0,001	0,153	0,7689	0,02	0,000
ŠEJL	PLQ - F	1314,15	14,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1314,29	2,00	0,20	0,00	0,131	0,5999	0,07	0,001
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1314,31	4,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1314,35	3,00	0,16	0,00	0,146	0,6033	0,05	0,002
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1314,38	4,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1314,42	1,00	0,09	0,00	0,156	0,6026	0,03	0,000
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1314,43	8,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ-Int_F_G	1314,51	7,00	29,43	2,06	0,276	0,6968	9,73	0,681
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1314,58	1,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1314,59	3,00	0,19	0,01	0,139	0,7334	0,06	0,002
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1314,62	4,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1314,66	4,00	0,01	0,00	0,155	0,7377	0,00	0,000
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1314,70	20,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000

SILT	PLQ-Int_F_G	1314,90	2,00	1,16	0,02	0,195	0,6089	0,38	0,008
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1314,92	17,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1315,09	4,00	0,12	0,00	0,184	0,6642	0,04	0,002
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1315,13	5,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1315,18	2,00	0,01	0,00	0,156	0,7244	0,00	0,000
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1315,20	9,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1315,29	3,00	0,03	0,00	0,156	0,7306	0,01	0,000
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1315,32	6,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ-Int_F_G	1315,38	3,00	31,07	0,93	0,278	0,8034	10,27	0,308
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1315,41	1,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1315,42	3,00	0,44	0,01	0,176	0,7439	0,15	0,004
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1315,45	1,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1315,46	2,00	0,01	0,00	0,142	0,7297	0,00	0,000
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1315,48	24,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1315,72	2,00	0,11	0,00	0,126	0,605	0,03	0,001
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1315,74	17,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ-Int_F_G	1315,91	4,00	23,27	0,93	0,268	0,765	7,69	0,308
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1315,95	8,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ-Int_F_G	1316,03	3,00	45,78	1,37	0,267	0,7437	15,13	0,454
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1316,06	6,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1316,12	6,00	0,08	0,00	0,128	0,7364	0,03	0,002
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1316,18	9,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1316,27	3,00	0,24	0,01	0,159	0,7432	0,08	0,002
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1316,30	9,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1316,39	2,00	1,19	0,02	0,192	0,7632	0,39	0,008
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1316,41	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ-Int_F_G	1316,43	6,00	45,22	2,71	0,275	0,76	14,95	0,897
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1316,49	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ-Int_F_G	1316,51	3,00	5,58	0,17	0,225	0,7218	1,85	0,055

ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1316,54	13,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1316,67	6,00	0,61	0,04	0,182	0,7388	0,20	0,012
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1316,73	32,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PIJESAK	PLQ-Int_F_G	1317,05	3,00	26,05	0,78	0,253	0,7572	8,61	0,258
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1317,08	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1317,10	4,00	3,00	0,12	0,196	0,7077	0,99	0,040
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1317,14	9,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ-Int_F_G	1317,23	3,00	7,44	0,22	0,218	0,7161	2,46	0,074
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1317,26	3,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
PRLJAVI PIJESAK	PLQ-Int_F_G	1317,29	3,00	4,73	0,14	0,198	0,6971	1,56	0,047
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1317,32	5,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1317,37	6,00	0,07	0,00	0,124	0,6639	0,02	0,001
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1317,43	16,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1317,59	6,00	0,05	0,00	0,139	0,6742	0,02	0,001
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1317,65	8,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1317,73	2,00	0,25	0,01	0,156	0,6872	0,08	0,002
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1317,75	2,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1317,77	2,00	0,05	0,00	0,149	0,6834	0,02	0,000
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1317,79	11,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1317,90	2,00	1,39	0,03	0,190	0,6288	0,46	0,009
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1317,92	6,00		0,00	0,000	1	0,00	0,000
SILT	PLQ-Int_F_G	1317,98	6,00	0,76	0,05	0,192	0,8345	0,25	0,015

## 7.5. PRILOG 5. Korekcije svojstava ležišta PLQ-F u bušotini SJ – 2 Dir

Tablica 62. Korekcije mehaničkih svojstava ležišta PLQ-F u bušotini SJ – 2 Dir.

Litologija	Gradijent naprezanja			Youngov modul elastičnosti			Žilavost			Poissonov omjer		
	Inicijalni gradie jnt	Faktor korekcije	Korigirani gradijent	Inicijalni Youngov modul	Faktor korekcije	Korigirani Youngov modul	Inicijalna žilavost	Faktor korekcije	Korigirana žilavost	Inicijalni Poissonov omjer	Faktor korekcije	Korigirani Poissonov omjer
	bar/m	+-%	bar/m	bar	+-%	bar	bar*m <sup>1/2</sup>	+-%	bar*m <sup>1/2</sup>		+-%	
	0,1629	-2,20%	0,1593	27579	2,50%	28269	20,88	5,00%	21,92	0,25	0,00%	0,250
	0,1606	-2,20%	0,1571	20684	2,50%	21201	19,78	5,00%	20,77	0,20	0,00%	0,200
	0,1583	-2,20%	0,1549	19995	2,50%	20498	18,13	5,00%	19,04	0,20	0,00%	0,200
	0,1561	-2,20%	0,1526	19305	2,50%	19788	16,48	5,00%	17,31	0,15	0,00%	0,150
	0,1538	-2,20%	0,1504	17926	2,50%	18375	15,38	5,00%	16,15	0,15	0,00%	0,150

Tablica 63. Korekcije propusnosti i ukupnog koeficijenta filtracije ležišta PLQ-F u bušotini SJ – 2 Dir.

Litologija		Propusnost iz NMR-a		Efektivna propusnost za plin			Efektivni koeficijent filtracije				
		Donja granica	Gornja granica	Koeficijent korekcije propusnosti	Donja granica	Gornja granica	Donja granica	Gornja granica	Faktor korekcije	Donja granica	Gornja granica
NAZIV	SIMBOL	mD	mD		mD	mD	m/min <sup>1/2</sup>	m/min <sup>1/2</sup>		m/min <sup>1/2</sup>	m/min <sup>1/2</sup>
ŠEJL		0	0	0,33059		0		0,00003	2,00	0,00000	0,00006
SILT		> 0	<= 3	0,33059	> 0	<= 1	0,00003	0,00030	2,00	0,00006	0,00061
PRLJAVI PIJESAK		> 3	<= 15	0,33059	> 1	<= 5	0,00030	0,00152	2,00	0,00061	0,00305
PIJESAK		> 15	<= 151	0,33059	> 5	<= 50	0,00152	0,00305	2,00	0,00305	0,00610
NEKONSOLID. PIJESAK		> 151	<= 1512	0,33059	> 50	<= 500	0,00305	0,03048	2,00	0,00610	0,06104

Tablica 64. Korigirani geomehanički parametri i ukupni koeficijenti filtracije proslojaka šireg područja ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir

Litologija	Ležište	Vrh proslojka ( m TVD)	Debljina proslojaka ( cm TVD)	Gradijent naprezanja u proslojku (bar/m)	Naprezanje u proslojku (bar)	Youngov modul elastičnosti proslojka (bar)	Poissonov koeficijent proslojka	Žilavost proslojka (bar*m <sup>1/2</sup> )	Efektivni koeficijent filtracije proslojka ( m/min <sup>1/2</sup> )
SILT	PLQ - E1	1298,15	1,00	0,157	203,90	21201	0,20	20,77	0,00007
ŠEJL	PLQ - E1	1298,16	5,00	0,159	206,78	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - E1	1298,21	2,00	0,153	198,17	19788	0,15	17,31	0,00315
ŠEJL	PLQ - E1	1298,23	1,00	0,159	206,79	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - E1	1298,24	13,00	0,153	198,17	19788	0,15	17,31	0,00313
ŠEJL	PLQ - E1	1298,37	3,00	0,159	206,81	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - E1	1298,40	2,00	0,157	203,94	21201	0,20	20,77	0,00006
ŠEJL	PLQ - E1	1298,42	2,00	0,159	206,82	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - E1	1298,44	2,00	0,157	203,95	21201	0,20	20,77	0,00006
ŠEJL	PLQ - E1	1298,46	2,00	0,159	206,83	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - E1	1298,48	1,00	0,157	203,96	21201	0,20	20,77	0,00011
ŠEJL	PLQ - E1	1298,49	4,00	0,159	206,83	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - E1	1298,53	2,00	0,155	201,09	20495	0,20	19,04	0,00109
ŠEJL	PLQ - E1	1298,55	1,00	0,159	206,84	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - E1	1298,56	4,00	0,153	198,22	19788	0,15	17,31	0,00354
ŠEJL	PLQ - E1	1298,60	5,00	0,159	206,85	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - E1	1298,65	3,00	0,153	198,24	19788	0,15	17,31	0,00327
ŠEJL	PLQ - E1	1298,68	7,00	0,159	206,86	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - E1	1298,75	3,00	0,153	198,25	19788	0,15	17,31	0,00384
ŠEJL	PLQ - E1	1298,78	6,00	0,159	206,88	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - E1	1298,84	5,00	0,153	198,27	19788	0,15	17,31	0,00318
ŠEJL	PLQ - E1	1298,89	2,00	0,159	206,89	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - E1	1298,91	2,00	0,153	198,28	19788	0,15	17,31	0,00335
ŠEJL	PLQ - E1	1298,93	3,00	0,159	206,90	28269	0,25	21,92	0,00006

PRLJAVI PIJESAK	PLQ - E1	1298,96	2,00	0,155	201,16	20495	0,20	19,04	0,00213
ŠEJL	PLQ - E1	1298,98	2,00	0,159	206,91	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - E1	1299,00	5,00	0,153	198,29	19788	0,15	17,31	0,00323
ŠEJL	PLQ - E1	1299,05	6,00	0,159	206,92	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - E1	1299,11	2,00	0,155	201,18	20495	0,20	19,04	0,00272
ŠEJL	PLQ - E1	1299,13	3,00	0,159	206,93	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - E1	1299,16	3,00	0,153	198,31	19788	0,15	17,31	0,00355
ŠEJL	PLQ - E1	1299,19	3,00	0,159	206,94	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - E1	1299,22	2,00	0,157	204,07	21201	0,20	20,77	0,00019
ŠEJL	PLQ - E1	1299,24	6,00	0,159	206,95	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - E1	1299,30	7,00	0,153	198,34	19788	0,15	17,31	0,00412
ŠEJL	PLQ - E1	1299,37	2,00	0,159	206,97	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - E1	1299,39	2,00	0,157	204,10	21201	0,20	20,77	0,00017
ŠEJL	PLQ - E1	1299,41	3,00	0,159	206,98	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - E1	1299,44	1,00	0,157	204,11	21201	0,20	20,77	0,00046
ŠEJL	PLQ - E1	1299,45	0,00	0,159	206,98	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - E1	1299,45	5,00	0,153	198,36	19788	0,15	17,31	0,00378
ŠEJL	PLQ - E1	1299,50	21,00	0,159	206,99	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - E1	1299,71	2,00	0,157	204,15	21201	0,20	20,77	0,00007
ŠEJL	PLQ - E1	1299,73	16,00	0,159	207,03	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - E1	1299,89	3,00	0,157	204,18	21201	0,20	20,77	0,00006
ŠEJL	PLQ - E1	1299,92	6,00	0,159	207,06	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - E1	1299,98	9,00	0,155	201,32	20495	0,20	19,04	0,00109
ŠEJL	PLQ - E1	1300,07	4,00	0,159	207,08	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - E1	1300,11	5,00	0,155	201,34	20495	0,20	19,04	0,00221
ŠEJL	PLQ - E1	1300,16	7,00	0,159	207,10	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - E1	1300,23	10,00	0,153	198,48	19788	0,15	17,31	0,00380
ŠEJL	PLQ - E1	1300,33	2,00	0,159	207,12	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - E1	1300,35	4,00	0,153	198,50	19788	0,15	17,31	0,00373



ŠEJL	PLQ - E1	1300,39	6,00	0,159	207,13	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - E1	1300,45	7,00	0,153	198,51	19788	0,15	17,31	0,00349
ŠEJL	PLQ - E1	1300,52	8,00	0,159	207,15	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - E1	1300,60	0,00	0,157	204,29	21201	0,20	20,77	0,00007
ŠEJL	PLQ - E1	1300,60	2,00	0,159	207,17	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - E1	1300,62	4,00	0,155	201,41	20495	0,20	19,04	0,00220
ŠEJL	PLQ - E1	1300,66	1,00	0,159	207,18	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - E1	1300,67	4,00	0,157	204,30	21201	0,20	20,77	0,00008
ŠEJL	PLQ - E1	1300,71	17,00	0,159	207,18	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - E1	1300,88	2,00	0,155	201,46	20495	0,20	19,04	0,00094
ŠEJL	PLQ - E1	1300,90	5,00	0,159	207,21	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - E1	1300,95	3,00	0,157	204,34	21201	0,20	20,77	0,00056
ŠEJL	PLQ - E1	1300,98	4,00	0,159	207,23	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - E1	1301,02	6,00	0,155	201,48	20495	0,20	19,04	0,00163
ŠEJL	PLQ - E1	1301,08	10,00	0,159	207,24	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - E1	1301,18	2,00	0,157	204,38	21201	0,20	20,77	0,00025
ŠEJL	PLQ - E1	1301,20	1,00	0,159	207,26	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - E1	1301,21	3,00	0,157	204,38	21201	0,20	20,77	0,00031
ŠEJL	PLQ - E1	1301,24	1,00	0,159	207,27	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - E1	1301,25	2,00	0,157	204,39	21201	0,20	20,77	0,00008
ŠEJL	PLQ - E1	1301,27	7,00	0,159	207,27	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - E1	1301,34	2,00	0,157	204,41	21201	0,20	20,77	0,00006
ŠEJL	PLQ - E1	1301,36	2,00	0,159	207,29	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - E1	1301,38	7,00	0,153	198,65	19788	0,15	17,31	0,00332
ŠEJL	PLQ - E1	1301,45	4,00	0,159	207,30	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - E1	1301,49	2,00	0,155	201,55	20495	0,20	19,04	0,00118
ŠEJL	PLQ - E1	1301,51	4,00	0,159	207,31	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - E1	1301,55	6,00	0,153	198,68	19788	0,15	17,31	0,00351
ŠEJL	PLQ - E1	1301,61	1,00	0,159	207,33	28269	0,25	21,92	0,00006

SILT	PLQ - E1	1301,62	4,00	0,157	204,45	21201	0,20	20,77	0,00007
ŠEJL	PLQ - E1	1301,66	10,00	0,159	207,34	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - E1	1301,76	3,00	0,157	204,47	21201	0,20	20,77	0,00009
ŠEJL	PLQ - E1	1301,79	14,00	0,159	207,36	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - E1	1301,93	1,00	0,157	204,50	21201	0,20	20,77	0,00010
ŠEJL	PLQ - E1	1301,94	30,00	0,159	207,38	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - E1	1302,24	4,00	0,157	204,55	21201	0,20	20,77	0,00015
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1302,28	5,00	0,159	207,43	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1302,33	4,00	0,157	204,56	21201	0,20	20,77	0,00007
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1302,37	8,00	0,159	207,45	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1302,45	3,00	0,157	204,58	21201	0,20	20,77	0,00034
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1302,48	6,00	0,159	207,47	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - Int_E1_F	1302,54	4,00	0,155	201,71	20495	0,20	19,04	0,00137
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1302,58	4,00	0,159	207,48	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1302,62	5,00	0,157	204,61	21201	0,20	20,77	0,00014
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1302,67	13,00	0,159	207,50	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1302,80	4,00	0,157	204,63	21201	0,20	20,77	0,00011
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1302,84	2,00	0,159	207,52	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - Int_E1_F	1302,86	2,00	0,153	198,88	19788	0,15	17,31	0,00361
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1302,88	8,00	0,159	207,53	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1302,96	4,00	0,157	204,66	21201	0,20	20,77	0,00007
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,00	13,00	0,159	207,55	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1303,13	4,00	0,157	204,69	21201	0,20	20,77	0,00053
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,17	12,00	0,159	207,58	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1303,29	3,00	0,157	204,71	21201	0,20	20,77	0,00012
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,32	2,00	0,159	207,60	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1303,34	2,00	0,157	204,72	21201	0,20	20,77	0,00006
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,36	6,00	0,159	207,61	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1303,42	2,00	0,157	204,73	21201	0,20	20,77	0,00007

ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,44	2,00	0,159	207,62	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1303,46	3,00	0,157	204,74	21201	0,20	20,77	0,00011
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,49	2,00	0,159	207,63	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1303,51	1,00	0,157	204,75	21201	0,20	20,77	0,00016
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,52	8,00	0,159	207,63	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1303,60	2,00	0,157	204,76	21201	0,20	20,77	0,00006
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,62	1,00	0,159	207,65	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - Int_E1_F	1303,63	3,00	0,153	199,00	19788	0,15	17,31	0,00322
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,66	7,00	0,159	207,65	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1303,73	8,00	0,157	204,78	21201	0,20	20,77	0,00006
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,81	11,00	0,159	207,68	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - Int_E1_F	1303,92	3,00	0,155	201,93	20495	0,20	19,04	0,00072
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1303,95	20,00	0,159	207,70	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - Int_E1_F	1304,15	8,00	0,153	199,08	19788	0,15	17,31	0,00345
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,23	8,00	0,159	207,74	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,31	5,00	0,157	204,87	21201	0,20	20,77	0,00037
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,36	10,00	0,159	207,77	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,46	3,00	0,157	204,90	21201	0,20	20,77	0,00007
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,49	1,00	0,159	207,79	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,50	2,00	0,157	204,90	21201	0,20	20,77	0,00007
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,52	5,00	0,159	207,79	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,57	1,00	0,157	204,91	21201	0,20	20,77	0,00007
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,58	5,00	0,159	207,80	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,63	1,00	0,157	204,92	21201	0,20	20,77	0,00007
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,64	4,00	0,159	207,81	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,68	2,00	0,157	204,93	21201	0,20	20,77	0,00007
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,70	5,00	0,159	207,82	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,75	3,00	0,157	204,94	21201	0,20	20,77	0,00007
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,78	3,00	0,159	207,83	28269	0,25	21,92	0,00006

SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,81	3,00	0,157	204,95	21201	0,20	20,77	0,00053
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,84	2,00	0,159	207,84	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - Int_E1_F	1304,86	3,00	0,155	202,07	20495	0,20	19,04	0,00149
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,89	1,00	0,159	207,85	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,90	1,00	0,157	204,96	21201	0,20	20,77	0,00006
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1304,91	8,00	0,159	207,85	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1304,99	7,00	0,157	204,98	21201	0,20	20,77	0,00006
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1305,06	9,00	0,159	207,88	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1305,15	6,00	0,157	205,00	21201	0,20	20,77	0,00019
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1305,21	3,00	0,159	207,90	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - Int_E1_F	1305,24	2,00	0,157	205,02	21201	0,20	20,77	0,00006
ŠEJL	PLQ - Int_E1_F	1305,26	11,00	0,159	207,91	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1305,37	4,00	0,157	205,04	21201	0,20	20,77	0,00007
ŠEJL	PLQ - F	1305,41	7,00	0,159	207,93	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1305,48	2,00	0,155	202,17	20495	0,20	19,04	0,00154
ŠEJL	PLQ - F	1305,50	2,00	0,159	207,95	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1305,52	2,00	0,157	205,06	21201	0,20	20,77	0,00020
ŠEJL	PLQ - F	1305,54	7,00	0,159	207,95	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1305,61	4,00	0,155	202,19	20495	0,20	19,04	0,00217
ŠEJL	PLQ - F	1305,65	4,00	0,159	207,97	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1305,69	6,00	0,153	199,31	19788	0,15	17,31	0,00310
ŠEJL	PLQ - F	1305,75	9,00	0,159	207,99	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1305,84	7,00	0,153	199,33	19788	0,15	17,31	0,00343
ŠEJL	PLQ - F	1305,91	6,00	0,159	208,01	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1305,97	6,00	0,153	199,35	19788	0,15	17,31	0,00328
ŠEJL	PLQ - F	1306,03	6,00	0,159	208,03	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1306,09	3,00	0,157	205,15	21201	0,20	20,77	0,00017
ŠEJL	PLQ - F	1306,12	1,00	0,159	208,05	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1306,13	4,00	0,157	205,16	21201	0,20	20,77	0,00019

ŠEJL	PLQ - F	1306,17	5,00	0,159	208,05	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1306,22	2,00	0,157	205,17	21201	0,20	20,77	0,00012
ŠEJL	PLQ - F	1306,24	11,00	0,159	208,06	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1306,35	2,00	0,153	199,41	19788	0,15	17,31	0,00336
ŠEJL	PLQ - F	1306,37	1,00	0,159	208,09	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1306,38	2,00	0,155	202,31	20495	0,20	19,04	0,00097
ŠEJL	PLQ - F	1306,40	3,00	0,159	208,09	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1306,43	5,00	0,157	205,20	21201	0,20	20,77	0,00009
ŠEJL	PLQ - F	1306,48	8,00	0,159	208,10	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1306,56	7,00	0,155	202,33	20495	0,20	19,04	0,00202
ŠEJL	PLQ - F	1306,63	7,00	0,159	208,13	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1306,70	6,00	0,153	199,47	19788	0,15	17,31	0,00310
ŠEJL	PLQ - F	1306,76	8,00	0,159	208,15	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1306,84	5,00	0,157	205,27	21201	0,20	20,77	0,00006
ŠEJL	PLQ - F	1306,89	5,00	0,159	208,17	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1306,94	4,00	0,155	202,39	20495	0,20	19,04	0,00140
ŠEJL	PLQ - F	1306,98	4,00	0,159	208,18	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1307,02	1,00	0,157	205,30	21201	0,20	20,77	0,00018
ŠEJL	PLQ - F	1307,03	3,00	0,159	208,19	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1307,06	8,00	0,153	199,52	19788	0,15	17,31	0,00390
ŠEJL	PLQ - F	1307,14	13,00	0,159	208,21	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1307,27	5,00	0,153	199,55	19788	0,15	17,31	0,00326
ŠEJL	PLQ - F	1307,32	1,00	0,159	208,24	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1307,33	7,00	0,155	202,45	20495	0,20	19,04	0,00072
ŠEJL	PLQ - F	1307,40	8,00	0,159	208,25	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1307,48	31,00	0,153	199,58	19788	0,15	17,31	0,00380
ŠEJL	PLQ - F	1307,79	3,00	0,159	208,31	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1307,82	1,00	0,157	205,42	21201	0,20	20,77	0,00037
ŠEJL	PLQ - F	1307,83	3,00	0,159	208,32	28269	0,25	21,92	0,00006

SILT	PLQ - F	1307,86	4,00	0,157	205,43	21201	0,20	20,77	0,00013
ŠEJL	PLQ - F	1307,90	8,00	0,159	208,33	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1307,98	3,00	0,157	205,45	21201	0,20	20,77	0,00006
ŠEJL	PLQ - F	1308,01	16,00	0,159	208,35	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1308,17	5,00	0,157	205,48	21201	0,20	20,77	0,00033
ŠEJL	PLQ - F	1308,22	6,00	0,159	208,38	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1308,28	5,00	0,157	205,50	21201	0,20	20,77	0,00006
ŠEJL	PLQ - F	1308,33	11,00	0,159	208,40	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1308,44	3,00	0,153	199,73	19788	0,15	17,31	0,00324
ŠEJL	PLQ - F	1308,47	2,00	0,159	208,42	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1308,49	5,00	0,153	199,74	19788	0,15	17,31	0,00333
ŠEJL	PLQ - F	1308,54	12,00	0,159	208,43	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1308,66	2,00	0,157	205,56	21201	0,20	20,77	0,00009
ŠEJL	PLQ - F	1308,68	6,00	0,159	208,45	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1308,74	2,00	0,157	205,57	21201	0,20	20,77	0,00008
ŠEJL	PLQ - F	1308,76	13,00	0,159	208,47	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1308,89	4,00	0,153	199,80	19788	0,15	17,31	0,00471
ŠEJL	PLQ - F	1308,93	1,00	0,159	208,49	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1308,94	4,00	0,157	205,60	21201	0,20	20,77	0,00010
ŠEJL	PLQ - F	1308,98	9,00	0,159	208,50	28269	0,25	21,92	0,00006
NEKONSOLIDIRANI	PLQ - F	1309,07	17,00	0,150	196,93	18375	0,15	16,15	0,00949
ŠEJL	PLQ - F	1309,24	8,00	0,159	208,54	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1309,32	3,00	0,153	199,87	19788	0,15	17,31	0,00573
ŠEJL	PLQ - F	1309,35	6,00	0,159	208,56	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1309,41	1,00	0,155	202,78	20495	0,20	19,04	0,00176
ŠEJL	PLQ - F	1309,42	3,00	0,159	208,57	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1309,45	0,00	0,157	205,68	21201	0,20	20,77	0,00008
ŠEJL	PLQ - F	1309,45	11,00	0,159	208,58	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1309,56	4,00	0,153	199,90	19788	0,15	17,31	0,00384

ŠEJL	PLQ - F	1309,60	2,00	0,159	208,60	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1309,62	6,00	0,153	199,91	19788	0,15	17,31	0,00305
ŠEJL	PLQ - F	1309,68	5,00	0,159	208,61	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1309,73	7,00	0,153	199,93	19788	0,15	17,31	0,00429
ŠEJL	PLQ - F	1309,80	2,00	0,159	208,63	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1309,82	3,00	0,157	205,74	21201	0,20	20,77	0,00020
ŠEJL	PLQ - F	1309,85	12,00	0,159	208,64	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1309,97	3,00	0,153	199,96	19788	0,15	17,31	0,00377
ŠEJL	PLQ - F	1310,00	5,00	0,159	208,66	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1310,05	2,00	0,157	205,77	21201	0,20	20,77	0,00015
ŠEJL	PLQ - F	1310,07	13,00	0,159	208,67	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1310,20	6,00	0,153	200,00	19788	0,15	17,31	0,00378
ŠEJL	PLQ - F	1310,26	9,00	0,159	208,71	28269	0,25	21,92	0,00006
NEKONSOLIDIRANI	PLQ - F	1310,35	32,00	0,150	197,12	18375	0,15	16,15	0,00734
ŠEJL	PLQ - F	1310,67	3,00	0,159	208,77	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1310,70	4,00	0,153	200,08	19788	0,15	17,31	0,00555
ŠEJL	PLQ - F	1310,74	8,00	0,159	208,78	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1310,82	5,00	0,153	200,09	19788	0,15	17,31	0,00514
ŠEJL	PLQ - F	1310,87	8,00	0,159	208,80	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1310,95	6,00	0,153	200,11	19788	0,15	17,31	0,00479
ŠEJL	PLQ - F	1311,01	8,00	0,159	208,82	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1311,09	1,00	0,157	205,94	21201	0,20	20,77	0,00046
ŠEJL	PLQ - F	1311,10	5,00	0,159	208,84	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1311,15	6,00	0,153	200,14	19788	0,15	17,31	0,00458
ŠEJL	PLQ - F	1311,21	1,00	0,159	208,86	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1311,22	6,00	0,155	203,06	20495	0,20	19,04	0,00093
ŠEJL	PLQ - F	1311,28	19,00	0,159	208,87	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1311,47	3,00	0,155	203,10	20495	0,20	19,04	0,00211
ŠEJL	PLQ - F	1311,50	3,00	0,159	208,90	28269	0,25	21,92	0,00006

PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1311,53	3,00	0,155	203,10	20495	0,20	19,04	0,00225
ŠEJL	PLQ - F	1311,56	6,00	0,159	208,91	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1311,62	3,00	0,155	203,12	20495	0,20	19,04	0,00110
ŠEJL	PLQ - F	1311,65	2,00	0,159	208,93	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1311,67	3,00	0,157	206,03	21201	0,20	20,77	0,00010
ŠEJL	PLQ - F	1311,70	6,00	0,159	208,93	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1311,76	6,00	0,153	200,24	19788	0,15	17,31	0,00323
ŠEJL	PLQ - F	1311,82	16,00	0,159	208,95	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1311,98	6,00	0,153	200,27	19788	0,15	17,31	0,00340
ŠEJL	PLQ - F	1312,04	9,00	0,159	208,99	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1312,13	3,00	0,153	200,29	19788	0,15	17,31	0,00376
ŠEJL	PLQ - F	1312,16	10,00	0,159	209,01	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1312,26	5,00	0,157	206,12	21201	0,20	20,77	0,00006
ŠEJL	PLQ - F	1312,31	22,00	0,159	209,03	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1312,53	7,00	0,155	203,26	20495	0,20	19,04	0,00188
ŠEJL	PLQ - F	1312,60	1,00	0,159	209,08	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1312,61	4,00	0,157	206,18	21201	0,20	20,77	0,00009
ŠEJL	PLQ - F	1312,65	19,00	0,159	209,09	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1312,84	5,00	0,155	203,31	20495	0,20	19,04	0,00082
ŠEJL	PLQ - F	1312,89	7,00	0,159	209,12	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1312,96	8,00	0,157	206,23	21201	0,20	20,77	0,00017
ŠEJL	PLQ - F	1313,04	1,00	0,159	209,15	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1313,05	1,00	0,157	206,24	21201	0,20	20,77	0,00027
ŠEJL	PLQ - F	1313,06	4,00	0,159	209,15	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1313,10	11,00	0,153	200,44	19788	0,15	17,31	0,00357
ŠEJL	PLQ - F	1313,21	16,00	0,159	209,17	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1313,37	21,00	0,153	200,48	19788	0,15	17,31	0,00359
ŠEJL	PLQ - F	1313,58	9,00	0,159	209,23	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1313,67	2,00	0,157	206,34	21201	0,20	20,77	0,00029

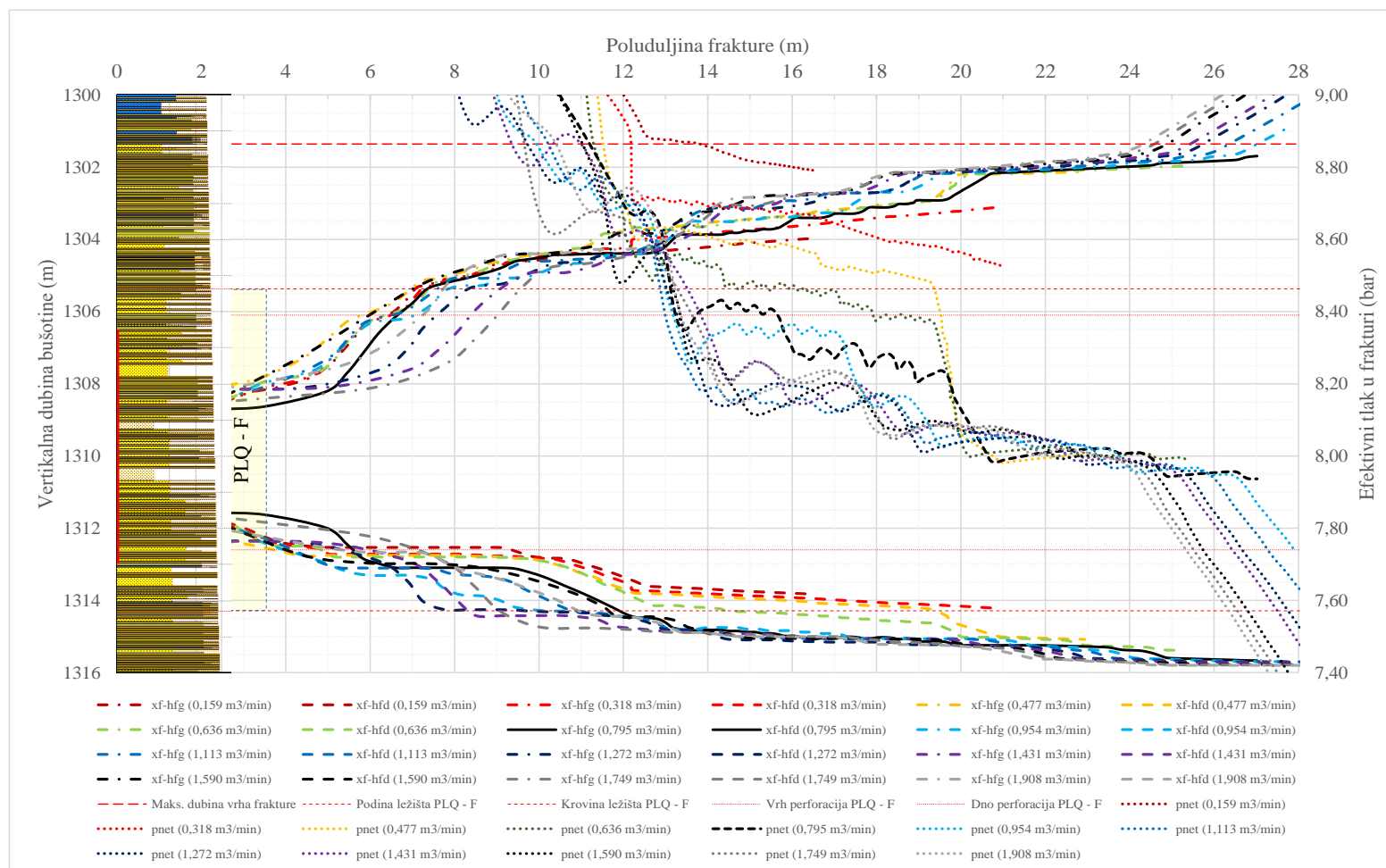


ŠEJL	PLQ - F	1313,69	3,00	0,159	209,25	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1313,72	2,00	0,155	203,44	20495	0,20	19,04	0,00100
ŠEJL	PLQ - F	1313,74	7,00	0,159	209,26	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1313,81	1,00	0,153	200,55	19788	0,15	17,31	0,00375
ŠEJL	PLQ - F	1313,82	6,00	0,159	209,27	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1313,88	6,00	0,155	203,47	20495	0,20	19,04	0,00258
ŠEJL	PLQ - F	1313,94	2,00	0,159	209,29	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1313,96	7,00	0,153	200,57	19788	0,15	17,31	0,00314
ŠEJL	PLQ - F	1314,03	2,00	0,159	209,31	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1314,05	2,00	0,157	206,40	21201	0,20	20,77	0,00058
ŠEJL	PLQ - F	1314,07	5,00	0,159	209,31	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1314,12	3,00	0,157	206,41	21201	0,20	20,77	0,00007
ŠEJL	PLQ - F	1314,15	14,00	0,159	209,32	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1314,29	2,00	0,157	206,44	21201	0,20	20,77	0,00010
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1314,31	4,00	0,159	209,35	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1314,35	3,00	0,157	206,45	21201	0,20	20,77	0,00009
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1314,38	4,00	0,159	209,36	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1314,42	1,00	0,157	206,46	21201	0,20	20,77	0,00008
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1314,43	8,00	0,159	209,37	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ-Int_F_G	1314,51	7,00	0,153	200,66	19788	0,15	17,31	0,00337
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1314,58	1,00	0,159	209,39	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1314,59	3,00	0,157	206,49	21201	0,20	20,77	0,00009
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1314,62	4,00	0,159	209,40	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1314,66	4,00	0,157	206,50	21201	0,20	20,77	0,00006
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1314,70	20,00	0,159	209,41	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1314,90	2,00	0,157	206,54	21201	0,20	20,77	0,00027
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1314,92	17,00	0,159	209,45	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1315,09	4,00	0,157	206,57	21201	0,20	20,77	0,00008
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1315,13	5,00	0,159	209,48	28269	0,25	21,92	0,00006

SILT	PLQ-Int_F_G	1315,18	2,00	0,157	206,58	21201	0,20	20,77	0,00006
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1315,20	9,00	0,159	209,49	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1315,29	3,00	0,157	206,60	21201	0,20	20,77	0,00007
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1315,32	6,00	0,159	209,51	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ-Int_F_G	1315,38	3,00	0,153	200,79	19788	0,15	17,31	0,00341
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1315,41	1,00	0,159	209,53	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1315,42	3,00	0,157	206,62	21201	0,20	20,77	0,00014
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1315,45	1,00	0,159	209,53	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1315,46	2,00	0,157	206,62	21201	0,20	20,77	0,00006
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1315,48	24,00	0,159	209,54	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1315,72	2,00	0,157	206,66	21201	0,20	20,77	0,00008
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1315,74	17,00	0,159	209,58	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ-Int_F_G	1315,91	4,00	0,153	200,87	19788	0,15	17,31	0,00323
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1315,95	8,00	0,159	209,61	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ-Int_F_G	1316,03	3,00	0,153	200,89	19788	0,15	17,31	0,00374
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1316,06	6,00	0,159	209,63	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1316,12	6,00	0,157	206,73	21201	0,20	20,77	0,00008
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1316,18	9,00	0,159	209,65	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1316,27	3,00	0,157	206,75	21201	0,20	20,77	0,00010
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1316,30	9,00	0,159	209,67	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1316,39	2,00	0,157	206,77	21201	0,20	20,77	0,00028
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1316,41	2,00	0,159	209,68	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ-Int_F_G	1316,43	6,00	0,153	200,95	19788	0,15	17,31	0,00373
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1316,49	2,00	0,159	209,70	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ-Int_F_G	1316,51	3,00	0,155	203,88	20495	0,20	19,04	0,00113
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1316,54	13,00	0,159	209,71	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1316,67	6,00	0,157	206,81	21201	0,20	20,77	0,00017
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1316,73	32,00	0,159	209,74	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ-Int_F_G	1317,05	3,00	0,153	201,05	19788	0,15	17,31	0,00330

ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1317,08	2,00	0,159	209,79	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1317,10	4,00	0,157	206,88	21201	0,20	20,77	0,00061
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1317,14	9,00	0,159	209,80	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ-Int_F_G	1317,23	3,00	0,155	203,99	20495	0,20	19,04	0,00150
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1317,26	3,00	0,159	209,82	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ-Int_F_G	1317,29	3,00	0,155	204,00	20495	0,20	19,04	0,00095
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1317,32	5,00	0,159	209,83	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1317,37	6,00	0,157	206,92	21201	0,20	20,77	0,00007
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1317,43	16,00	0,159	209,85	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1317,59	6,00	0,157	206,96	21201	0,20	20,77	0,00007
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1317,65	8,00	0,159	209,88	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1317,73	2,00	0,157	206,98	21201	0,20	20,77	0,00011
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1317,75	2,00	0,159	209,90	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1317,77	2,00	0,157	206,99	21201	0,20	20,77	0,00007
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1317,79	11,00	0,159	209,90	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1317,90	2,00	0,157	207,01	21201	0,20	20,77	0,00031
ŠEJL	PLQ-Int_F_G	1317,92	6,00	0,159	209,93	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ-Int_F_G	1317,98	6,00	0,157	207,02	21201	0,20	20,77	0,00020

**7.6. PRILOG 6. Dijagram ravnotežnih odnosa geometrije frakture u funkciji veličine protoka prethodnice ležišta PLQ-F u bušotini SJ – 2 Dir**



Slika 66. Dijagram ravnotežnih odnosa geometrije frakture u funkciji veličine protoka prethodnice ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir

## 7.7. PRILOG 7. Rezultati proračuna proizvodnog potencijala ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir

Tablica 65. Indikatorska krivulja ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir generirana temeljem hidrodinamskih mjerenja iz ožujka 2015.

$P_{wf}$	$\bar{p}$	$\bar{\mu}_g$	$\bar{Z}$	$s_f$	$D_f$	$s_G$	$D_G$	$s_{GP}$	$D_{GP}$	$a_{FP}$	$b_{FP}$	$q_{gSC}$
(Bar)	(Bar)	(mPa s)			(m <sup>3</sup> /dan) <sup>-1</sup>		(m <sup>3</sup> /dan) <sup>-1</sup>		(m <sup>3</sup> /dan) <sup>-1</sup>	(Pa <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> /s) <sup>-1</sup> )	(Pa <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> /s) <sup>-2</sup> )	(m <sup>3</sup> /dan)
0,00	61,48	0,013107	0,908586	-2,232507	8,9709E-07	0,096875	9,9692E-08	0,000011	2,07108E-09	3,3662E+13	5,7591E+11	362 139
10,00	66,48	0,013237	0,902322	-2,232507	8,9709E-07	0,096875	9,9692E-08	0,000011	2,07108E-09	3,3762E+13	5,7762E+11	358 895
20,00	71,48	0,013374	0,896289	-2,232507	8,9709E-07	0,096875	9,9692E-08	0,000011	2,07108E-09	3,3881E+13	5,7967E+11	350 997
30,00	76,48	0,013516	0,890503	-2,232507	8,9709E-07	0,096875	9,9692E-08	0,000011	2,07108E-09	3,4021E+13	5,8206E+11	338 466
40,00	81,48	0,013665	0,884977	-2,232507	8,9709E-07	0,096875	9,9692E-08	0,000011	2,07108E-09	3,4182E+13	5,8481E+11	321 316
50,00	86,48	0,013819	0,879727	-2,232507	8,9709E-07	0,096875	9,9692E-08	0,000011	2,07108E-09	3,4364E+13	5,8792E+11	299 555
60,00	91,48	0,013980	0,874766	-2,232507	8,9709E-07	0,096875	9,9692E-08	0,000011	2,07108E-09	3,4567E+13	5,9140E+11	273 184
70,00	96,48	0,014146	0,870107	-2,232507	8,9709E-07	0,096875	9,9692E-08	0,000011	2,07108E-09	3,4793E+13	5,9526E+11	242 198
80,00	101,48	0,014319	0,865761	-2,232507	8,9709E-07	0,096875	9,9692E-08	0,000011	2,07108E-09	3,5040E+13	5,9950E+11	206 582
90,00	106,48	0,014497	0,861739	-2,232507	8,9709E-07	0,096875	9,9692E-08	0,000011	2,07108E-09	3,5311E+13	6,0413E+11	166 312
100,00	111,48	0,014680	0,858051	-2,232507	8,9709E-07	0,096875	9,9692E-08	0,000011	2,07108E-09	3,5605E+13	6,0915E+11	121 350
112,09	117,53	0,014907	0,854077	-2,232507	8,9709E-07	0,096875	9,9692E-08	0,000011	2,07108E-09	3,5987E+13	6,1570E+11	60 670
120,00	121,48	0,015062	0,851705	-2,232507	8,9709E-07	0,096875	9,9692E-08	0,000011	2,07108E-09	3,6261E+13	6,2039E+11	17 119
122,97	122,97	0,015101	0,851147	-2,232507	8,9709E-07	0,096875	9,9692E-08	0,000011	2,07108E-09	3,6332E+13	6,2160E+11	0

Tablica 66. Rezultati iterativnog proračuna *UFD* modela za teoretski optimalnu poluduljinu frakture 27,02 m i dinamički tlak  $p_{wf} = 112,09 \text{ bar}$  u ležištu PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

$N_{re,pretp}$	$k_{f,ef}$ (mD)	$V_R$ (m <sup>3</sup> )	$V_{prop-2kriila}$ (m <sup>3</sup> )	$N_{prop}$	$C_{ID,opt}$	$J_{ID,max}$	$x_{f,opt}$ (m)	$w_{f,opt}$ (m)	$J_{ID}$	$p_{sred}$ (bar)	$\mu_{sred}$ (mPa s)	$Z_{sred}$	$q_{gSC}$ (m <sup>3</sup> /dan)	$p_{wf}$ (bar)	
0	180 000	2 522 071	2,946	0,059107	1,6000	0,415938	51,10	0,003232	0,41594	117,53	0,014907	0,854077	128 821	112,09	
1,0000	90 000	2 522 071	2,946	0,029553	1,6000	0,363533	36,13	0,004570	0,36353	117,53	0,014907	0,854077	112 590	112,09	
2,0000	60 000	2 522 071	2,946	0,019702	1,6000	0,338580	29,50	0,005597	0,33858	117,53	0,014907	0,854077	104 862	112,09	
3,0000	45 000	2 522 071	2,946	0,014777	1,6000	0,322856	25,55	0,006463	0,32286	117,53	0,014907	0,854077	99 992	112,09	
2,5770	50 322	2 522 071	2,946	0,016524	1,6000	0,328789	27,02	0,006112	0,32879	117,53	0,014907	0,854077	101 830	112,09	
$q_{gSC}$ (m <sup>3</sup> /dan)	$p_{wf}$ (bar)	$\mu_{g,wf}$ (mPa s)	$Z_{g,wf}$	$B_{g,wf}$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	$\rho_{g,wf}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$v_{g,wf}$ (m/s)	F	$\beta'$ (1/m)	$N_{Re,izračunati}$	Pogreška (%)	$S_{f,uk}$	FOI	$S_{ff}$	$S_{ck,w}$	$S_{ck,k}$
128 821	112,09	0,014717	0,857355	0,008358	81,751781	0,432316	1,258925	51024	22,0557	#DIV/0!	-4,775664	2,123	0,000000	0,000000	0,000000
112 590	112,09	0,014717	0,857355	0,008358	81,751781	0,267179	1,258925	51024	6,8154	581,541395	-4,429091	1,856	0,000000	0,000000	0,000000
104 862	112,09	0,014717	0,857355	0,008358	81,751781	0,203176	1,258925	51024	3,4552	72,759675	-4,226358	1,728	0,000000	0,000000	0,000000
99 992	112,09	0,014717	0,857355	0,008358	81,751781	0,167785	1,258925	51024	2,1400	28,666909	-4,082517	1,648	0,000000	0,000000	0,000000
101 830	112,09	0,014717	0,857355	0,008358	81,751781	0,180689	1,258925	51024	2,5771	0,006789	-4,138407	1,678	0,000000	0,000000	0,000000

Tablica 67. Rezultati iterativnog proračuna proizvodnosti ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir prema *UFD* modelu za teoretski optimalnu poluduljinu frakture 27,02 m i dinamički tlak  $p_{wf} = 112,09 \text{ bar}$ .

$N_{re,prep}$	$k_{f,ef}$ (mD)	$V_R$ (m <sup>3</sup> )	$V_{prop-2kriila}$ (m <sup>3</sup> )	$N_{prop}$	$C_{ID}$	$J_{ID,f}$	$x_{f,opt}$ (m)	$w_{f,opt}$ (m)	$J_{ID}$	$P_{sred}$ (bar)	$\mu_{sred}$ (mPa s)	$Z_{sred}$	$q_{gSC,f}$ (m <sup>3</sup> /dan)	$P_{wf}$ (bar)
0,0000	180 000	2 522 071	2,946	0,059107	5,7231	0,386223	27,02	0,006112	0,386223	122,97	0,015101	0,851147	0	122,97
2,5768	50 325	2 522 071	2,946	0,016525	1,6001	0,328807	27,02	0,006112	0,328807	117,53	0,014907	0,854077	101 808	112,09
4,5428	32 474	2 522 071	2,946	0,010664	1,0325	0,304195	27,02	0,006112	0,304195	106,48	0,014497	0,861739	263 599	90,00
6,0721	25 452	2 522 071	2,946	0,008358	0,8093	0,290283	27,02	0,006112	0,290283	91,48	0,013980	0,874766	421 651	60,00
6,7207	23 314	2 522 071	2,946	0,007656	0,7413	0,285301	27,02	0,006112	0,285301	81,48	0,013665	0,884977	491 837	40,00
7,1334	22 131	2 522 071	2,946	0,007267	0,7037	0,282360	27,02	0,006112	0,282360	71,48	0,013374	0,896289	534 670	20,00
7,3147	21 648	2 522 071	2,946	0,007109	0,6883	0,281119	27,02	0,006112	0,281119	61,48	0,013107	0,908586	550 351	0,00

$q_{gSC,f}$ (m <sup>3</sup> /dan)	$P_{wf}$ (bar)	$\mu_{g,wf}$ (mPa s)	$Z_{g,wf}$	$B_{g,wf}$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	$\rho_{g,wf}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$v_{g,wf}$ (m/s)	F	$\beta'$ (1/m)	$N_{Re,izračunati}$	Pogreška (%)	$S_{f,uk}$	FOI	$S_f$	$S_{ck,w}$	$S_{ck,k}$	$S_f$
0	122,97	0,015101	0,851147	0,007569	90,269721	0,000000	1,258925	51024	0,0000		-4,050000	1,972	0,000000	0,000000	0,000000	-4,590691
101 808	112,09	0,014717	0,857355	0,008358	81,753950	0,180647	1,258925	51024	2,5767	0,000803	-4,138568	1,678	0,000000	0,000000	0,000000	-4,138568
263 599	90,00	0,013947	0,875735	0,010609	64,405986	0,593708	1,258925	51024	4,5428	0,000339	-3,892504	1,553	0,000000	0,000000	0,000000	-3,892504
421 651	60,00	0,013082	0,909865	0,016442	41,556712	1,471862	1,258925	51024	6,0722	0,001947	-3,734951	1,482	0,000000	0,000000	0,000000	-3,734951
491 837	40,00	0,012628	0,937094	0,025192	27,122842	2,630520	1,258925	51024	6,7208	0,000621	-3,674800	1,456	0,000000	0,000000	0,000000	-3,674800
534 670	20,00	0,012278	0,966850	0,050731	13,468773	5,758549	1,258925	51024	7,1333	0,001955	-3,638291	1,441	0,000000	0,000000	0,000000	-3,638291
550 351	0,00	0,012056	0,998368	1,086372	0,628956	126,933083	1,258925	51024	7,3147	0,000098	-3,622661	1,435	0,000000	0,000000	0,000000	-3,622661

Tablica 68. Zavisnost tlakova u bušotini i proizvodnje plina (indikatorska krivulja) te vrijednosti komponenti *skina* za teoretski optimalnu poluduljinu frakture 27,02 m i dinamički tlak  $p_{wf} = 112,09 \text{ bar}$  u ležištu PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir.

$p_{wf}$ (bar)	$q_{gSC,f}$ (m <sup>3</sup> /dan)	$s_{f,uk}$	$s_f$	$D_f q_{gSC}$	$k_{f,ef}$ (mD)
122,97	0		-4,17	4,169427	180 000
120,00	30 631	-4,35	-4,17	-0,181876	81 035
99,70	197 941	-3,98	-4,17	0,193365	37 283
60,00	421 799	-3,74	-4,17	0,433260	25 465
40,00	492 015	-3,68	-4,17	0,493361	23 326
20,00	534 864	-3,64	-4,17	0,529847	22 142
0,00	550 552	-3,62	-4,17	0,545463	21 659

Tablica 69. Rezultati iterativnog proračuna proizvodnosti ležišta PLQ-F bušotine SJ – 2 Dir prema *UFD* modelu za optimalnu poluduljinu frakture  $x_{f,opt} = 27,01m$ , optimalnu širinu frakture  $w_{opt} = 6,12mm$  i srednju visinu frakture  $h_{ef,f} = 8,84m$ .





$N_{re,pretp}$	$k_{ref}(mD)$	$V_R (m^3)$	$V_{prop-2krila} (m^3)$	$N_{prop}$	$C_{ID}$	$J_{ID,f}$	$x_{f,opt} (m)$	$w_{f,opt} (m)$	$J_{ID}$	$P_{sred} (bar)$	$\mu_{sred} (mPa s)$	$Z_{sred}$	$q_{gSC,f}(m^3/dan)$	$p_{wf} (bar)$
0,0000	180 000	2 522 071	2,946	0,059107	5,7328	0,386241	27,01	0,006121	0,386241	122,97	0,015101	0,851147	0	122,97
2,5750	50 349	2 522 071	2,946	0,016533	1,6036	0,328898	27,01	0,006121	0,328898	117,53	0,014907	0,854077	101 837	112,09
4,5401	32 491	2 522 071	2,946	0,010669	1,0348	0,304296	27,01	0,006121	0,304296	106,48	0,014497	0,861739	263 687	90,00
6,0686	25 465	2 522 071	2,946	0,008362	0,8110	0,290385	27,01	0,006121	0,290385	91,48	0,013980	0,874766	421 799	60,00
6,7169	23 326	2 522 071	2,946	0,007659	0,7429	0,285404	27,01	0,006121	0,285404	81,48	0,013665	0,884977	492 015	40,00
7,1294	22 142	2 522 071	2,946	0,007271	0,7052	0,282463	27,01	0,006121	0,282463	71,48	0,013374	0,896289	534 864	20,00
7,3105	21 659	2 522 071	2,946	0,007112	0,6898	0,281222	27,01	0,006121	0,281222	61,48	0,013107	0,908586	550 552	0,00

$q_{gSC,r}(m^3/dan)$	$p_{wf} (bar)$	$\mu_{g,wf} (mPa s)$	$Z_{g,wf}$	$B_{g,wf}(m^3/m^3)$	$\rho_{g,wf} (kg/m^3)$	$v_{g,wf} (m/s)$	F	$\beta' (l/m)$	$N_{Re,izračunati}$	Pogreška (%)	$S_{f,uk}$	FOI	$S_f$	$S_{ck,w}$	$S_{ck,k}$	$S_f$
0	122,97	0,015101	0,851147	0,007569	90,269721	0,000000	1,258925	51024	0,0000		-4,050000	1,972	0,000000	0,000000	0,000000	-4,590812
101 837	112,09	0,014717	0,857355	0,008358	81,753950	0,180438	1,258925	51024	2,5750	0,000804	-4,139411	1,679	0,000000	0,000000	0,000000	-4,139411
263 687	90,00	0,013947	0,875735	0,010609	64,405986	0,593056	1,258925	51024	4,5401	0,000522	-3,893598	1,553	0,000000	0,000000	0,000000	-3,893598
421 799	60,00	0,013082	0,909865	0,016442	41,556712	1,470274	1,258925	51024	6,0686	0,000068	-3,736167	1,482	0,000000	0,000000	0,000000	-3,736167
492 015	40,00	0,012628	0,937094	0,025192	27,122842	2,627703	1,258925	51024	6,7169	0,000876	-3,676065	1,457	0,000000	0,000000	0,000000	-3,676065
534 864	20,00	0,012278	0,966850	0,050731	13,468773	5,752399	1,258925	51024	7,1292	0,002325	-3,639580	1,442	0,000000	0,000000	0,000000	-3,639580
550 552	0,00	0,012056	0,998368	1,086372	0,628956	126,797804	1,258925	51024	7,3106	0,000601	-3,623964	1,436	0,000000	0,000000	0,000000	-3,623964

## 7.8. PRILOG 8. Rezultati proračuna proizvodnog potencijala ležišta PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir

Tablica 70. Korekcije propusnosti i ukupnog koeficijenta filtracije ležišta PLQ-F u bušotini SJ – 1 Dir

Litologija		Propusnost iz NMR-a		Efektivna propusnost za plin			Efektivni koeficijent filtracije				
		Donja granica	Gornja granica	Koeficijent korekcije propusnosti	Donja granica	Gornja granica	Donja granica	Gornja granica	Faktor korekcije	Donja granica	Gornja granica
NAZIV	SIMBOL	mD	mD		mD	mD	m/min <sup>1/2</sup>	m/min <sup>1/2</sup>		m/min <sup>1/2</sup>	m/min <sup>1/2</sup>
ŠEJL		0	0	0,24099		0		0,00003	2,00272	0,00000	0,00006
SILT		> 0	<= 4	0,24099	> 0	<= 1	0,00003	0,00030	2,00272	0,00006	0,00061
PRLJAVI PIJESAK		> 4	<= 21	0,24099	> 1	<= 5	0,00030	0,00152	2,00272	0,00061	0,00305
PIJESAK		> 21	<= 207	0,24099	> 5	<= 50	0,00152	0,00305	2,00272	0,00305	0,00610

Tablica 71. Rezultati TLA analize i izračuna distribucije efektivnih propusnosti šireg područja ležišta PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir

Litologija	Ležište	Podina proslojka ( m TVD)	Debljina proslojka ( cm TVD)	Distribucija propusnosti po Timur-Coatsu ( mD )	Moćnost proslojka po Timur-Coatsu ( mD m )	Efektivna propusnost proslojka za plin ( mD )	Moćnost proslojka ( mD m )	Efektivni koeficijent filtracije ( m/min <sup>1/2</sup> )
ŠEJL	PLQ - intE2F	1348,87	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
ŠEJL	PLQ - intE2F	1348,97	23,84	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00006
SILT	PLQ - intE2F	1349,21	3,88	2,00	0,08	0,48	0,019	0,00033
SILT	PLQ - intE2F	1349,24	2,71	3,00	0,08	0,72	0,020	0,00046
ŠEJL	PLQ - intE2F	1349,27	2,91	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00006



SILT	PLQ - intE2F	1349,30	7,56	3,00	0,23	0,72	0,055	0,00046
ŠEJL	PLQ - intE2F	1349,38	17,83	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1349,55	7,75	5,00	0,39	1,20	0,093	0,00074
ŠEJL	PLQ - intE2F	1349,63	3,49	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1349,67	2,52	6,00	0,15	1,45	0,036	0,00088
ŠEJL	PLQ - intE2F	1349,69	16,86	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00006
SILT	PLQ - intE2F	1349,86	7,95	2,00	0,16	0,48	0,038	0,00033
ŠEJL	PLQ - intE2F	1349,94	10,08	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00006
SILT	PLQ - intE2F	1350,04	9,69	2,00	0,19	0,48	0,047	0,00033
ŠEJL	PLQ - intE2F	1350,14	12,41	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1350,26	5,43	5,36	0,29	1,29	0,070	0,00079
ŠEJL	PLQ - intE2F	1350,32	3,49	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00006
SILT	PLQ - intE2F	1350,35	3,88	3,20	0,12	0,77	0,030	0,00048
SILT	PLQ - intE2F	1350,39	6,59	2,60	0,17	0,63	0,041	0,00041
ŠEJL	PLQ - intE2F	1350,46	4,85	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00006
SILT	PLQ - intE2F	1350,50	3,30	4,10	0,14	0,99	0,033	0,00060
ŠEJL	PLQ - intE2F	1350,54	12,21	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00006
SILT	PLQ - intE2F	1350,66	6,78	2,10	0,14	0,51	0,034	0,00034
ŠEJL	PLQ - intE2F	1350,73	4,65	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00006
SILT	PLQ - intE2F	1350,77	6,98	2,30	0,16	0,55	0,039	0,00037
ŠEJL	PLQ - intE2F	1350,84	8,72	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1350,93	6,20	5,60	0,35	1,35	0,084	0,00082
ŠEJL	PLQ - intE2F	1350,99	8,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1351,07	2,91	7,20	0,21	1,74	0,050	0,00106

ŠEJL	PLQ - intE2F	1351,10	7,75	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1351,18	7,95	4,23	0,34	1,02	0,081	0,00062
SILT	PLQ - intE2F	1351,26	3,88	1,00	0,04	0,24	0,009	0,00019
ŠEJL	PLQ - intE2F	1351,30	10,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00006
ŠEJL	PLQ - intE2F	1351,34	4,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1351,41	6,58	6,52	0,43	1,57	0,10	0,00096
ŠEJL	PLQ - intE2F	1351,49	8,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1351,51	2,38	18,85	0,45	4,54	0,11	0,00277
ŠEJL	PLQ - intE2F	1351,69	17,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1351,76	6,95	7,60	0,53	1,83	0,13	0,00112
ŠEJL	PLQ - intE2F	1351,82	6,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1351,83	0,73	17,69	0,13	4,26	0,03	0,00260
ŠEJL	PLQ - intE2F	1351,84	1,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1351,86	2,01	17,05	0,34	4,11	0,08	0,00251
ŠEJL	PLQ - intE2F	1351,96	9,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
SILT	PLQ - intE2F	1352,03	6,95	2,11	0,15	0,51	0,04	0,00034
ŠEJL	PLQ - intE2F	1352,15	12,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1352,19	4,20	5,39	0,23	1,30	0,05	0,00079
ŠEJL	PLQ - intE2F	1352,30	10,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1352,36	6,46	9,16	0,59	2,21	0,14	0,00135
ŠEJL	PLQ - F	1352,39	3,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1352,46	7,04	10,36	0,73	2,50	0,18	0,00152
ŠEJL	PLQ - F	1352,65	18,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1352,70	4,37	6,19	0,27	1,49	0,07	0,00091
ŠEJL	PLQ - F	1352,73	3,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1352,74	1,52	8,47	0,13	2,04	0,03	0,00125
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1352,80	5,32	7,63	0,41	1,84	0,10	0,00112
ŠEJL	PLQ - F	1352,85	4,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006

PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1352,88	3,23	6,88	0,22	1,66	0,05	0,00101
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1352,96	7,99	11,60	0,93	2,80	0,22	0,00171
ŠEJL	PLQ - F	1353,05	8,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,09	4,56	13,40	0,61	3,23	0,15	0,00197
ŠEJL	PLQ - F	1353,18	8,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,23	4,56	6,30	0,29	1,52	0,07	0,00093
ŠEJL	PLQ - F	1353,42	19,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,50	7,99	4,86	0,39	1,17	0,09	0,00071
ŠEJL	PLQ - F	1353,58	7,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,60	2,09	15,11	0,32	3,64	0,08	0,00222
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,65	4,37	19,42	0,85	4,68	0,20	0,00286
ŠEJL	PLQ - F	1353,70	4,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,74	4,37	11,60	0,51	2,80	0,12	0,00171
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,75	0,76	7,67	0,06	1,85	0,01	0,00113
ŠEJL	PLQ - F	1353,79	4,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,85	5,32	5,11	0,27	1,23	0,07	0,00075
ŠEJL	PLQ - F	1353,88	3,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,90	2,28	7,04	0,16	1,70	0,04	0,00104
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,92	1,71	9,20	0,16	2,22	0,04	0,00135
ŠEJL	PLQ - F	1353,97	4,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,98	1,52	15,90	0,24	3,83	0,06	0,00234
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1354,00	1,71	17,15	0,29	4,13	0,07	0,00252
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1354,02	2,09	15,50	0,32	3,73	0,08	0,00228
ŠEJL	PLQ - F	1354,07	5,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1354,08	0,76	7,89	0,06	1,90	0,01	0,00116
ŠEJL	PLQ - F	1354,12	3,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1354,18	6,27	5,85	0,37	1,41	0,09	0,00086
ŠEJL	PLQ - F	1354,24	5,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006

PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1354,29	4,94	7,76	0,38	1,87	0,09	0,00114
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1354,33	4,37	8,79	0,38	2,12	0,09	0,00129
ŠEJL	PLQ - F	1354,55	22,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1354,63	7,99	6,20	0,49	1,49	0,12	0,00091
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1354,69	5,51	10,39	0,57	2,50	0,14	0,00153
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1354,70	0,95	19,05	0,18	4,59	0,04	0,00280
ŠEJL	PLQ - F	1354,72	2,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1354,74	1,33	38,53	0,51	9,29	0,12	0,00334
PIJESAK	PLQ - F	1354,75	1,71	45,95	0,79	11,07	0,19	0,00346
PIJESAK	PLQ - F	1354,77	1,71	54,31	0,93	13,09	0,22	0,00360
PIJESAK	PLQ - F	1354,79	1,71	62,65	1,07	15,10	0,26	0,00374
PIJESAK	PLQ - F	1354,82	3,42	70,62	2,42	17,02	0,58	0,00387
PIJESAK	PLQ - F	1354,86	3,42	78,82	2,70	18,99	0,65	0,00400
PIJESAK	PLQ - F	1354,91	5,13	88,61	4,55	21,35	1,10	0,00416
ŠEJL	PLQ - F	1354,92	1,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1354,93	0,38	75,84	0,29	18,28	0,07	0,00395
PIJESAK	PLQ - F	1354,94	1,14	70,24	0,80	16,93	0,19	0,00386
PIJESAK	PLQ - F	1354,95	1,14	61,84	0,71	14,90	0,17	0,00372
PIJESAK	PLQ - F	1354,96	1,14	53,44	0,61	12,88	0,15	0,00359
PIJESAK	PLQ - F	1354,97	0,95	45,74	0,43	11,02	0,10	0,00346
PIJESAK	PLQ - F	1354,98	1,33	37,35	0,50	9,00	0,12	0,00332
ŠEJL	PLQ - F	1355,02	3,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,08	6,63	8,93	0,59	2,15	0,14	0,00131
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,11	2,53	8,07	0,20	1,94	0,05	0,00119
ŠEJL	PLQ - F	1355,21	10,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,30	8,38	12,24	1,03	2,95	0,25	0,00180
ŠEJL	PLQ - F	1355,37	7,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,41	4,29	5,83	0,25	1,41	0,06	0,00086

ŠEJL	PLQ - F	1355,51	10,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
SILT	PLQ - F	1355,55	3,51	2,86	0,10	0,69	0,02	0,00044
ŠEJL	PLQ - F	1355,58	2,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,65	6,63	5,67	0,38	1,37	0,09	0,00083
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,66	1,36	8,84	0,12	2,13	0,03	0,00130
ŠEJL	PLQ - F	1355,77	10,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,82	5,26	9,86	0,52	2,38	0,13	0,00145
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,83	0,97	7,99	0,08	1,93	0,02	0,00118
ŠEJL	PLQ - F	1355,84	1,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,87	2,53	7,03	0,18	1,69	0,04	0,00103
ŠEJL	PLQ - F	1355,91	4,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,97	6,63	5,32	0,35	1,28	0,09	0,00078
ŠEJL	PLQ - F	1356,10	12,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1356,13	3,70	7,27	0,27	1,75	0,06	0,00107
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1356,19	5,46	9,97	0,54	2,40	0,13	0,00147
ŠEJL	PLQ - F	1356,21	1,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1356,24	2,92	15,11	0,44	3,64	0,11	0,00222
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1356,29	5,46	19,38	1,06	4,67	0,25	0,00285
ŠEJL	PLQ - F	1356,44	15,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1356,51	6,43	7,02	0,45	1,69	0,11	0,00103
ŠEJL	PLQ - F	1356,54	3,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1356,55	0,58	8,54	0,05	2,06	0,01	0,00126
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1356,62	7,21	6,17	0,44	1,49	0,11	0,00091
ŠEJL	PLQ - F	1356,69	7,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1356,77	7,41	5,19	0,38	1,25	0,09	0,00076
ŠEJL	PLQ - F	1357,05	27,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1357,11	6,82	4,42	0,30	1,07	0,07	0,00065
ŠEJL	PLQ - F	1357,14	2,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006

PIJESAK	PLQ - F	1357,16	1,36	27,75	0,38	6,69	0,09	0,00317
PIJESAK	PLQ - F	1357,17	1,17	37,21	0,44	8,97	0,10	0,00332
PIJESAK	PLQ - F	1357,18	1,17	45,94	0,54	11,07	0,13	0,00346
PIJESAK	PLQ - F	1357,19	0,97	53,94	0,53	13,00	0,13	0,00359
PIJESAK	PLQ - F	1357,20	1,17	61,94	0,72	14,93	0,17	0,00373
PIJESAK	PLQ - F	1357,21	1,17	70,67	0,83	17,03	0,20	0,00387
PIJESAK	PLQ - F	1357,23	1,17	79,40	0,93	19,14	0,22	0,00401
PIJESAK	PLQ - F	1357,28	5,65	96,33	5,44	23,21	1,31	0,00429
PIJESAK	PLQ - F	1357,43	15,01	113,22	16,99	27,28	4,09	0,00456
PIJESAK	PLQ - F	1357,47	3,70	99,59	3,69	24,00	0,89	0,00434
ŠEJL	PLQ - F	1357,48	1,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1357,55	6,24	87,99	5,49	21,20	1,32	0,00415
PIJESAK	PLQ - F	1357,59	4,68	79,46	3,72	19,15	0,90	0,00401
PIJESAK	PLQ - F	1357,61	1,95	70,68	1,38	17,03	0,33	0,00387
PIJESAK	PLQ - F	1357,63	1,95	62,15	1,21	14,98	0,29	0,00373
PIJESAK	PLQ - F	1357,65	1,75	54,05	0,95	13,02	0,23	0,00360
PIJESAK	PLQ - F	1357,67	1,95	45,94	0,90	11,07	0,22	0,00346
ŠEJL	PLQ - F	1357,69	1,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1357,71	2,14	29,32	0,63	7,07	0,15	0,00319
PIJESAK	PLQ - F	1357,75	4,29	20,85	0,89	5,02	0,22	0,00305
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1357,76	1,17	15,64	0,18	3,77	0,04	0,00230
ŠEJL	PLQ - F	1357,80	4,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1357,87	7,02	5,38	0,38	1,30	0,09	0,00079
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1357,88	0,58	8,69	0,05	2,09	0,01	0,00128
ŠEJL	PLQ - F	1357,94	6,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1357,97	3,10	15,15	0,47	3,65	0,11	0,00223
ŠEJL	PLQ - F	1358,16	19,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1358,22	5,61	21,17	1,19	5,10	0,29	0,00306

PIJESAK	PLQ - F	1358,28	6,00	28,89	1,73	6,96	0,42	0,00319
ŠEJL	PLQ - F	1358,35	6,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1358,38	2,90	18,63	0,54	4,49	0,13	0,00274
ŠEJL	PLQ - F	1358,50	12,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1358,56	6,20	19,66	1,22	4,74	0,29	0,00289
ŠEJL	PLQ - F	1358,63	6,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1358,68	5,42	7,86	0,43	1,89	0,10	0,00116
ŠEJL	PLQ - F	1358,72	3,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1358,78	6,78	6,96	0,47	1,68	0,11	0,00102
ŠEJL	PLQ - F	1358,82	3,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1358,86	4,84	8,96	0,43	2,16	0,10	0,00132
ŠEJL	PLQ - F	1359,04	17,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
SILT	PLQ - F	1359,08	4,45	2,83	0,13	0,68	0,03	0,00044
ŠEJL	PLQ - F	1359,31	22,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1359,35	4,84	4,24	0,21	1,02	0,05	0,00062
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1359,39	3,29	12,58	0,41	3,03	0,10	0,00185
PIJESAK	PLQ - F	1359,42	3,29	20,87	0,69	5,03	0,17	0,00305
PIJESAK	PLQ - F	1359,50	7,55	28,69	2,17	6,91	0,52	0,00318
PIJESAK	PLQ - F	1359,51	1,36	23,67	0,32	5,70	0,08	0,00310
ŠEJL	PLQ - F	1359,66	14,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1359,70	4,26	20,94	0,89	5,05	0,21	0,00306
PIJESAK	PLQ - F	1359,73	3,29	29,13	0,96	7,02	0,23	0,00319
PIJESAK	PLQ - F	1359,76	2,52	36,59	0,92	8,82	0,22	0,00331
ŠEJL	PLQ - F	1359,78	2,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1359,85	6,20	46,63	2,89	11,24	0,70	0,00348
PIJESAK	PLQ - F	1359,89	4,65	37,39	1,74	9,01	0,42	0,00332
PIJESAK	PLQ - F	1359,93	3,68	29,74	1,09	7,17	0,26	0,00320
ŠEJL	PLQ - F	1360,08	15,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006

PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1360,11	2,90	5,66	0,16	1,36	0,04	0,00083
ŠEJL	PLQ - F	1360,29	17,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1360,32	2,52	7,06	0,18	1,70	0,04	0,00104
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1360,41	8,91	12,08	1,08	2,91	0,26	0,00178
ŠEJL	PLQ - F	1360,44	3,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1360,46	1,74	8,94	0,16	2,15	0,04	0,00131
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1360,47	0,97	7,87	0,08	1,90	0,02	0,00116
ŠEJL	PLQ - intFG	1360,68	21,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1360,70	1,36	7,92	0,11	1,91	0,03	0,00116
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1360,73	2,91	9,04	0,26	2,18	0,06	0,00133
ŠEJL	PLQ - intFG	1360,91	18,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1360,99	8,14	13,20	1,07	3,18	0,26	0,00194
ŠEJL	PLQ - intFG	1361,15	16,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1361,20	4,46	12,59	0,56	3,03	0,14	0,00185
ŠEJL	PLQ - intFG	1361,43	23,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1361,51	7,75	10,34	0,80	2,49	0,19	0,00152
ŠEJL	PLQ - intFG	1361,58	6,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1361,64	6,59	9,67	0,64	2,33	0,15	0,00142
ŠEJL	PLQ - intFG	1361,75	11,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1361,81	6,01	7,21	0,43	1,74	0,10	0,00106
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1361,83	2,13	8,72	0,19	2,10	0,04	0,00128
ŠEJL	PLQ - intFG	1361,89	5,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1361,95	6,20	11,28	0,70	2,72	0,17	0,00166
ŠEJL	PLQ - intFG	1362,04	8,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1362,12	7,75	20,60	1,60	4,96	0,38	0,00303
ŠEJL	PLQ - intFG	1362,13	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PIJESAK	PLQ - intFG	1362,17	4,26	24,84	1,06	5,99	0,26	0,00312
ŠEJL	PLQ - intFG	1362,18	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006



<b>PIJESAK</b>	<b>PLQ - intFG</b>	1362,23	5,43	22,08	1,20	5,32	0,29	0,00307
ŠEJL	<b>PLQ - intFG</b>	1362,24	0,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
<b>PRLJAVI PIJESAK</b>	<b>PLQ - intFG</b>	1362,30	5,62	18,93	1,06	4,56	0,26	0,00278
ŠEJL	<b>PLQ - intFG</b>	1362,42	12,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
<b>PRLJAVI PIJESAK</b>	<b>PLQ - intFG</b>	1362,44	2,13	9,17	0,20	2,21	0,05	0,00135
<b>PRLJAVI PIJESAK</b>	<b>PLQ - intFG</b>	1362,50	6,20	6,47	0,40	1,56	0,10	0,00095
ŠEJL	<b>PLQ - intFG</b>	1362,56	5,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
<b>PRLJAVI PIJESAK</b>	<b>PLQ - intFG</b>	1362,61	4,46	5,09	0,23	1,23	0,05	0,00075
ŠEJL	<b>PLQ - intFG</b>	1362,67	6,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
<b>PRLJAVI PIJESAK</b>	<b>PLQ - intFG</b>	1362,72	4,65	7,39	0,34	1,78	0,08	0,00109
ŠEJL	<b>PLQ - intFG</b>	1362,84	11,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
<b>PRLJAVI PIJESAK</b>	<b>PLQ - intFG</b>	1362,89	5,62	7,51	0,42	1,81	0,10	0,00111
ŠEJL	<b>PLQ - intFG</b>	1363,04	14,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
<b>PRLJAVI PIJESAK</b>	<b>PLQ - intFG</b>	1363,08	4,46	8,90	0,40	2,14	0,10	0,00131
<b>PRLJAVI PIJESAK</b>	<b>PLQ - intFG</b>	1363,12	3,88	7,69	0,30	1,85	0,07	0,00113
ŠEJL	<b>PLQ - intFG</b>	1363,18	6,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
<b>PRLJAVI PIJESAK</b>	<b>PLQ - intFG</b>	1363,20	1,94	6,28	0,12	1,51	0,03	0,00092
ŠEJL	<b>PLQ - intFG</b>	1363,33	12,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
<b>PRLJAVI PIJESAK</b>	<b>PLQ - intFG</b>	1363,35	1,55	8,44	0,13	2,03	0,03	0,00124
<b>PRLJAVI PIJESAK</b>	<b>PLQ - intFG</b>	1363,40	5,04	7,90	0,40	1,90	0,10	0,00116
ŠEJL	<b>PLQ - intFG</b>	1363,48	8,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
<b>PRLJAVI PIJESAK</b>	<b>PLQ - intFG</b>	1363,53	4,65	11,55	0,54	2,78	0,13	0,00170
ŠEJL	<b>PLQ - intFG</b>	1363,64	11,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
<b>PIJESAK</b>	<b>PLQ - intFG</b>	1363,69	5,43	22,93	1,24	5,53	0,30	0,00309
ŠEJL	<b>PLQ - intFG</b>	1363,93	23,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
<b>PRLJAVI PIJESAK</b>	<b>PLQ - intFG</b>	1363,97	3,88	15,72	0,61	3,79	0,15	0,00231
<b>PRLJAVI PIJESAK</b>	<b>PLQ - intFG</b>	1364,00	2,71	16,87	0,46	4,07	0,11	0,00248
ŠEJL	<b>PLQ - intFG</b>	1364,03	2,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006

PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1364,10	7,56	11,56	0,87	2,79	0,21	0,00170
ŠEJL	PLQ - intFG	1364,28	17,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PIJESAK	PLQ - intFG	1364,36	7,75	33,39	2,59	8,05	0,62	0,00326
ŠEJL	PLQ - intFG	1364,39	3,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1364,42	2,52	20,41	0,51	4,92	0,12	0,00300
ŠEJL	PLQ - intFG	1364,59	16,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1364,67	7,95	5,69	0,45	1,37	0,11	0,00084
ŠEJL	PLQ - intFG	1364,77	10,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1364,86	9,69	10,20	0,99	2,46	0,24	0,00150
ŠEJL	PLQ - intFG	1364,99	12,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1365,04	5,43	15,03	0,82	3,62	0,20	0,00221
ŠEJL	PLQ - intFG	1365,08	3,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1365,12	3,88	10,07	0,39	2,43	0,09	0,00148
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1365,18	6,59	6,62	0,44	1,60	0,11	0,00097
ŠEJL	PLQ - intFG	1365,23	4,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1365,26	3,30	10,53	0,35	2,54	0,08	0,00155
ŠEJL	PLQ - intFG	1365,38	12,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1365,45	6,78	4,80	0,33	1,16	0,08	0,00071
ŠEJL	PLQ - intFG	1365,50	4,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1365,57	6,98	4,29	0,30	1,03	0,07	0,00063
ŠEJL	PLQ - intFG	1365,66	8,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1365,72	6,20	9,21	0,57	2,22	0,14	0,00136
ŠEJL	PLQ - intFG	1366,09	37,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1366,12	2,91	14,73	0,43	3,55	0,10	0,00217
ŠEJL	PLQ - intFG	1366,20	7,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1366,28	7,95	4,23	0,34	1,02	0,08	0,00062
ŠEJL	PLQ - intFG	1367,10	81,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00006

Tablica 72. Geomehanički parametri i ukupni koeficijenti filtracije proslojaka šireg područja ležišta PLQ-F bušotine SJ – 1 Dir

Litologija	Ležište	Podina proslojka ( m TVD)	Debljina proslojka ( cm TVD)	Gradijent naprezanja u proslojku (bar/m)	Naprezanje u proslojku (bar)	Youngov modul elastičnosti proslojka (bar)	Poissonov koeficijent proslojka	Žilavost proslojka (bar*m <sup>1/2</sup> )	Efektivni koeficijent filtracije ( m*min <sup>1/2</sup> )
ŠEJL	PLQ - intE2F	1348,87	10,00	0,159	214,85	28269	0,250	21,92	0,00006
ŠEJL	PLQ - intE2F	1348,97	23,84	0,159	214,87	28269	0,250	21,92	0,00006
SILT	PLQ - intE2F	1349,21	3,88	0,157	211,92	21201	0,200	20,77	0,00033
SILT	PLQ - intE2F	1349,24	2,71	0,157	211,93	21201	0,200	20,77	0,00046
ŠEJL	PLQ - intE2F	1349,27	2,91	0,159	214,92	28269	0,250	21,92	0,00006
SILT	PLQ - intE2F	1349,30	7,56	0,157	211,94	21201	0,200	20,77	0,00046
ŠEJL	PLQ - intE2F	1349,38	17,83	0,159	214,94	28269	0,250	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1349,55	7,75	0,155	208,99	20495	0,200	19,04	0,00074
ŠEJL	PLQ - intE2F	1349,63	3,49	0,159	214,98	28269	0,250	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1349,67	2,52	0,155	209,01	20495	0,200	19,04	0,00088
ŠEJL	PLQ - intE2F	1349,69	16,86	0,159	214,99	28269	0,250	21,92	0,00006
SILT	PLQ - intE2F	1349,86	7,95	0,157	212,03	21201	0,200	20,77	0,00033
ŠEJL	PLQ - intE2F	1349,94	10,08	0,159	215,03	28269	0,250	21,92	0,00006
SILT	PLQ - intE2F	1350,04	9,69	0,157	212,05	21201	0,200	20,77	0,00033
ŠEJL	PLQ - intE2F	1350,14	12,41	0,159	215,06	28269	0,250	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1350,26	5,43	0,155	209,10	20495	0,200	19,04	0,00079
ŠEJL	PLQ - intE2F	1350,32	3,49	0,159	215,09	28269	0,250	21,92	0,00006
SILT	PLQ - intE2F	1350,35	3,88	0,157	212,10	21201	0,200	20,77	0,00048
SILT	PLQ - intE2F	1350,39	6,59	0,157	212,11	21201	0,200	20,77	0,00041

ŠEJL	PLQ - intE2F	1350,46	4,85	0,159	215,11	28269	0,250	21,92	0,00006
SILT	PLQ - intE2F	1350,50	3,30	0,157	212,13	21201	0,200	20,77	0,00060
ŠEJL	PLQ - intE2F	1350,54	12,21	0,159	215,12	28269	0,250	21,92	0,00006
SILT	PLQ - intE2F	1350,66	6,78	0,157	212,15	21201	0,200	20,77	0,00034
ŠEJL	PLQ - intE2F	1350,73	4,65	0,159	215,15	28269	0,250	21,92	0,00006
SILT	PLQ - intE2F	1350,77	6,98	0,157	212,17	21201	0,200	20,77	0,00037
ŠEJL	PLQ - intE2F	1350,84	8,72	0,159	215,17	28269	0,250	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1350,93	6,20	0,155	209,21	20495	0,200	19,04	0,00082
ŠEJL	PLQ - intE2F	1350,99	8,00	0,159	215,19	28269	0,250	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1351,07	2,91	0,155	209,23	20495	0,200	19,04	0,00106
ŠEJL	PLQ - intE2F	1351,10	7,75	0,159	215,21	28269	0,250	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1351,18	7,95	0,155	209,24	20495	0,200	19,04	0,00062
SILT	PLQ - intE2F	1351,26	3,88	0,157	212,25	21201	0,200	20,77	0,00019
ŠEJL	PLQ - intE2F	1351,30	10,00	0,159	215,24	28269	0,250	21,92	0,00006
ŠEJL	PLQ - intE2F	1351,34	4,59	0,159	215,25	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1351,41	6,58	0,155	209,28	20495	0,20	19,04	0,00096
ŠEJL	PLQ - intE2F	1351,49	8,04	0,159	215,27	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1351,51	2,38	0,155	209,30	20495	0,20	19,04	0,00277
ŠEJL	PLQ - intE2F	1351,69	17,73	0,159	215,30	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1351,76	6,95	0,155	209,33	20495	0,20	19,04	0,00112
ŠEJL	PLQ - intE2F	1351,82	6,22	0,159	215,33	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1351,83	0,73	0,155	209,35	20495	0,20	19,04	0,00260
ŠEJL	PLQ - intE2F	1351,84	1,28	0,159	215,33	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1351,86	2,01	0,155	209,35	20495	0,20	19,04	0,00251
ŠEJL	PLQ - intE2F	1351,96	9,51	0,159	215,35	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - intE2F	1352,03	6,95	0,157	212,37	21201	0,20	20,77	0,00034
ŠEJL	PLQ - intE2F	1352,15	12,43	0,159	215,38	28269	0,25	21,92	0,00006

PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intE2F	1352,19	4,20	0,155	209,40	20495	0,20	19,04	0,00079
ŠEJL	PLQ - intE2F	1352,30	10,42	0,159	215,40	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1352,36	6,46	0,155	209,43	20495	0,20	19,04	0,00135
ŠEJL	PLQ - F	1352,39	3,04	0,159	215,42	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1352,46	7,04	0,155	209,44	20495	0,20	19,04	0,00152
ŠEJL	PLQ - F	1352,65	18,82	0,159	215,46	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1352,70	4,37	0,155	209,48	20495	0,20	19,04	0,00091
ŠEJL	PLQ - F	1352,73	3,42	0,159	215,47	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1352,74	1,52	0,155	209,49	20495	0,20	19,04	0,00125
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1352,80	5,32	0,155	209,50	20495	0,20	19,04	0,00112
ŠEJL	PLQ - F	1352,85	4,94	0,159	215,49	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1352,88	3,23	0,155	209,51	20495	0,20	19,04	0,00101
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1352,96	7,99	0,155	209,52	20495	0,20	19,04	0,00171
ŠEJL	PLQ - F	1353,05	8,75	0,159	215,52	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,09	4,56	0,155	209,54	20495	0,20	19,04	0,00197
ŠEJL	PLQ - F	1353,18	8,94	0,159	215,54	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,23	4,56	0,155	209,56	20495	0,20	19,04	0,00093
ŠEJL	PLQ - F	1353,42	19,39	0,159	215,58	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,50	7,99	0,155	209,60	20495	0,20	19,04	0,00071
ŠEJL	PLQ - F	1353,58	7,99	0,159	215,61	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,60	2,09	0,155	209,62	20495	0,20	19,04	0,00222
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,65	4,37	0,155	209,63	20495	0,20	19,04	0,00286
ŠEJL	PLQ - F	1353,70	4,94	0,159	215,62	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,74	4,37	0,155	209,64	20495	0,20	19,04	0,00171
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,75	0,76	0,155	209,64	20495	0,20	19,04	0,00113
ŠEJL	PLQ - F	1353,79	4,56	0,159	215,64	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,85	5,32	0,155	209,66	20495	0,20	19,04	0,00075
ŠEJL	PLQ - F	1353,88	3,42	0,159	215,65	28269	0,25	21,92	0,00006

PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,90	2,28	0,155	209,67	20495	0,20	19,04	0,00104
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,92	1,71	0,155	209,67	20495	0,20	19,04	0,00135
ŠEJL	PLQ - F	1353,97	4,56	0,159	215,67	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1353,98	1,52	0,155	209,68	20495	0,20	19,04	0,00234
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1354,00	1,71	0,155	209,68	20495	0,20	19,04	0,00252
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1354,02	2,09	0,155	209,68	20495	0,20	19,04	0,00228
ŠEJL	PLQ - F	1354,07	5,51	0,159	215,68	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1354,08	0,76	0,155	209,69	20495	0,20	19,04	0,00116
ŠEJL	PLQ - F	1354,12	3,99	0,159	215,69	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1354,18	6,27	0,155	209,71	20495	0,20	19,04	0,00086
ŠEJL	PLQ - F	1354,24	5,13	0,159	215,71	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1354,29	4,94	0,155	209,73	20495	0,20	19,04	0,00114
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1354,33	4,37	0,155	209,73	20495	0,20	19,04	0,00129
ŠEJL	PLQ - F	1354,55	22,25	0,159	215,76	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1354,63	7,99	0,155	209,78	20495	0,20	19,04	0,00091
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1354,69	5,51	0,155	209,79	20495	0,20	19,04	0,00153
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1354,70	0,95	0,155	209,79	20495	0,20	19,04	0,00280
ŠEJL	PLQ - F	1354,72	2,85	0,159	215,79	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1354,74	1,33	0,153	206,80	19788	0,15	17,31	0,00334
PIJESAK	PLQ - F	1354,75	1,71	0,153	206,80	19788	0,15	17,31	0,00346
PIJESAK	PLQ - F	1354,77	1,71	0,153	206,80	19788	0,15	17,31	0,00360
PIJESAK	PLQ - F	1354,79	1,71	0,153	206,81	19788	0,15	17,31	0,00374
PIJESAK	PLQ - F	1354,82	3,42	0,153	206,81	19788	0,15	17,31	0,00387
PIJESAK	PLQ - F	1354,86	3,42	0,153	206,82	19788	0,15	17,31	0,00400
PIJESAK	PLQ - F	1354,91	5,13	0,153	206,82	19788	0,15	17,31	0,00416
ŠEJL	PLQ - F	1354,92	1,52	0,159	215,82	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1354,93	0,38	0,153	206,83	19788	0,15	17,31	0,00395
PIJESAK	PLQ - F	1354,94	1,14	0,153	206,83	19788	0,15	17,31	0,00386

PIJESAK	PLQ - F	1354,95	1,14	0,153	206,83	19788	0,15	17,31	0,00372
PIJESAK	PLQ - F	1354,96	1,14	0,153	206,83	19788	0,15	17,31	0,00359
PIJESAK	PLQ - F	1354,97	0,95	0,153	206,83	19788	0,15	17,31	0,00346
PIJESAK	PLQ - F	1354,98	1,33	0,153	206,84	19788	0,15	17,31	0,00332
ŠEJL	PLQ - F	1355,02	3,28	0,159	215,83	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,08	6,63	0,155	209,85	20495	0,20	19,04	0,00131
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,11	2,53	0,155	209,85	20495	0,20	19,04	0,00119
ŠEJL	PLQ - F	1355,21	10,33	0,159	215,87	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,30	8,38	0,155	209,88	20495	0,20	19,04	0,00180
ŠEJL	PLQ - F	1355,37	7,02	0,159	215,89	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,41	4,29	0,155	209,90	20495	0,20	19,04	0,00086
ŠEJL	PLQ - F	1355,51	10,52	0,159	215,91	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1355,55	3,51	0,157	212,92	21201	0,20	20,77	0,00044
ŠEJL	PLQ - F	1355,58	2,92	0,159	215,92	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,65	6,63	0,155	209,94	20495	0,20	19,04	0,00083
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,66	1,36	0,155	209,94	20495	0,20	19,04	0,00130
ŠEJL	PLQ - F	1355,77	10,91	0,159	215,95	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,82	5,26	0,155	209,96	20495	0,20	19,04	0,00145
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,83	0,97	0,155	209,96	20495	0,20	19,04	0,00118
ŠEJL	PLQ - F	1355,84	1,17	0,159	215,97	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,87	2,53	0,155	209,97	20495	0,20	19,04	0,00103
ŠEJL	PLQ - F	1355,91	4,09	0,159	215,98	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1355,97	6,63	0,155	209,99	20495	0,20	19,04	0,00078
ŠEJL	PLQ - F	1356,10	12,08	0,159	216,01	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1356,13	3,70	0,155	210,01	20495	0,20	19,04	0,00107
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1356,19	5,46	0,155	210,02	20495	0,20	19,04	0,00147
ŠEJL	PLQ - F	1356,21	1,95	0,159	216,02	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1356,24	2,92	0,155	210,03	20495	0,20	19,04	0,00222

PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1356,29	5,46	0,155	210,04	20495	0,20	19,04	0,00285
ŠEJL	PLQ - F	1356,44	15,20	0,159	216,06	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1356,51	6,43	0,155	210,07	20495	0,20	19,04	0,00103
ŠEJL	PLQ - F	1356,54	3,51	0,159	216,08	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1356,55	0,58	0,155	210,08	20495	0,20	19,04	0,00126
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1356,62	7,21	0,155	210,09	20495	0,20	19,04	0,00091
ŠEJL	PLQ - F	1356,69	7,41	0,159	216,10	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1356,77	7,41	0,155	210,11	20495	0,20	19,04	0,00076
ŠEJL	PLQ - F	1357,05	27,87	0,159	216,16	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1357,11	6,82	0,155	210,16	20495	0,20	19,04	0,00065
ŠEJL	PLQ - F	1357,14	2,92	0,159	216,17	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1357,16	1,36	0,153	207,17	19788	0,15	17,31	0,00317
PIJESAK	PLQ - F	1357,17	1,17	0,153	207,17	19788	0,15	17,31	0,00332
PIJESAK	PLQ - F	1357,18	1,17	0,153	207,17	19788	0,15	17,31	0,00346
PIJESAK	PLQ - F	1357,19	0,97	0,153	207,17	19788	0,15	17,31	0,00359
PIJESAK	PLQ - F	1357,20	1,17	0,153	207,17	19788	0,15	17,31	0,00373
PIJESAK	PLQ - F	1357,21	1,17	0,153	207,18	19788	0,15	17,31	0,00387
PIJESAK	PLQ - F	1357,23	1,17	0,153	207,18	19788	0,15	17,31	0,00401
PIJESAK	PLQ - F	1357,28	5,65	0,153	207,19	19788	0,15	17,31	0,00429
PIJESAK	PLQ - F	1357,43	15,01	0,153	207,21	19788	0,15	17,31	0,00456
PIJESAK	PLQ - F	1357,47	3,70	0,153	207,22	19788	0,15	17,31	0,00434
ŠEJL	PLQ - F	1357,48	1,36	0,159	216,23	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1357,55	6,24	0,153	207,23	19788	0,15	17,31	0,00415
PIJESAK	PLQ - F	1357,59	4,68	0,153	207,23	19788	0,15	17,31	0,00401
PIJESAK	PLQ - F	1357,61	1,95	0,153	207,24	19788	0,15	17,31	0,00387
PIJESAK	PLQ - F	1357,63	1,95	0,153	207,24	19788	0,15	17,31	0,00373
PIJESAK	PLQ - F	1357,65	1,75	0,153	207,24	19788	0,15	17,31	0,00360
PIJESAK	PLQ - F	1357,67	1,95	0,153	207,25	19788	0,15	17,31	0,00346



ŠEJL	PLQ - F	1357,69	1,75	0,159	216,26	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1357,71	2,14	0,153	207,25	19788	0,15	17,31	0,00319
PIJESAK	PLQ - F	1357,75	4,29	0,153	207,26	19788	0,15	17,31	0,00305
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1357,76	1,17	0,155	210,26	20495	0,20	19,04	0,00230
ŠEJL	PLQ - F	1357,80	4,09	0,159	216,28	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1357,87	7,02	0,155	210,28	20495	0,20	19,04	0,00079
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1357,88	0,58	0,155	210,28	20495	0,20	19,04	0,00128
ŠEJL	PLQ - F	1357,94	6,21	0,159	216,30	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1357,97	3,10	0,155	210,30	20495	0,20	19,04	0,00223
ŠEJL	PLQ - F	1358,16	19,17	0,159	216,34	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1358,22	5,61	0,153	207,33	19788	0,15	17,31	0,00306
PIJESAK	PLQ - F	1358,28	6,00	0,153	207,34	19788	0,15	17,31	0,00319
ŠEJL	PLQ - F	1358,35	6,97	0,159	216,36	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1358,38	2,90	0,155	210,36	20495	0,20	19,04	0,00274
ŠEJL	PLQ - F	1358,50	12,00	0,159	216,39	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1358,56	6,20	0,155	210,39	20495	0,20	19,04	0,00289
ŠEJL	PLQ - F	1358,63	6,78	0,159	216,41	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1358,68	5,42	0,155	210,41	20495	0,20	19,04	0,00116
ŠEJL	PLQ - F	1358,72	3,48	0,159	216,42	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1358,78	6,78	0,155	210,42	20495	0,20	19,04	0,00102
ŠEJL	PLQ - F	1358,82	3,10	0,159	216,44	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1358,86	4,84	0,155	210,43	20495	0,20	19,04	0,00132
ŠEJL	PLQ - F	1359,04	17,42	0,159	216,47	28269	0,25	21,92	0,00006
SILT	PLQ - F	1359,08	4,45	0,157	213,48	21201	0,20	20,77	0,00044
ŠEJL	PLQ - F	1359,31	22,26	0,159	216,52	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1359,35	4,84	0,155	210,51	20495	0,20	19,04	0,00062
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1359,39	3,29	0,155	210,52	20495	0,20	19,04	0,00185
PIJESAK	PLQ - F	1359,42	3,29	0,153	207,51	19788	0,15	17,31	0,00305

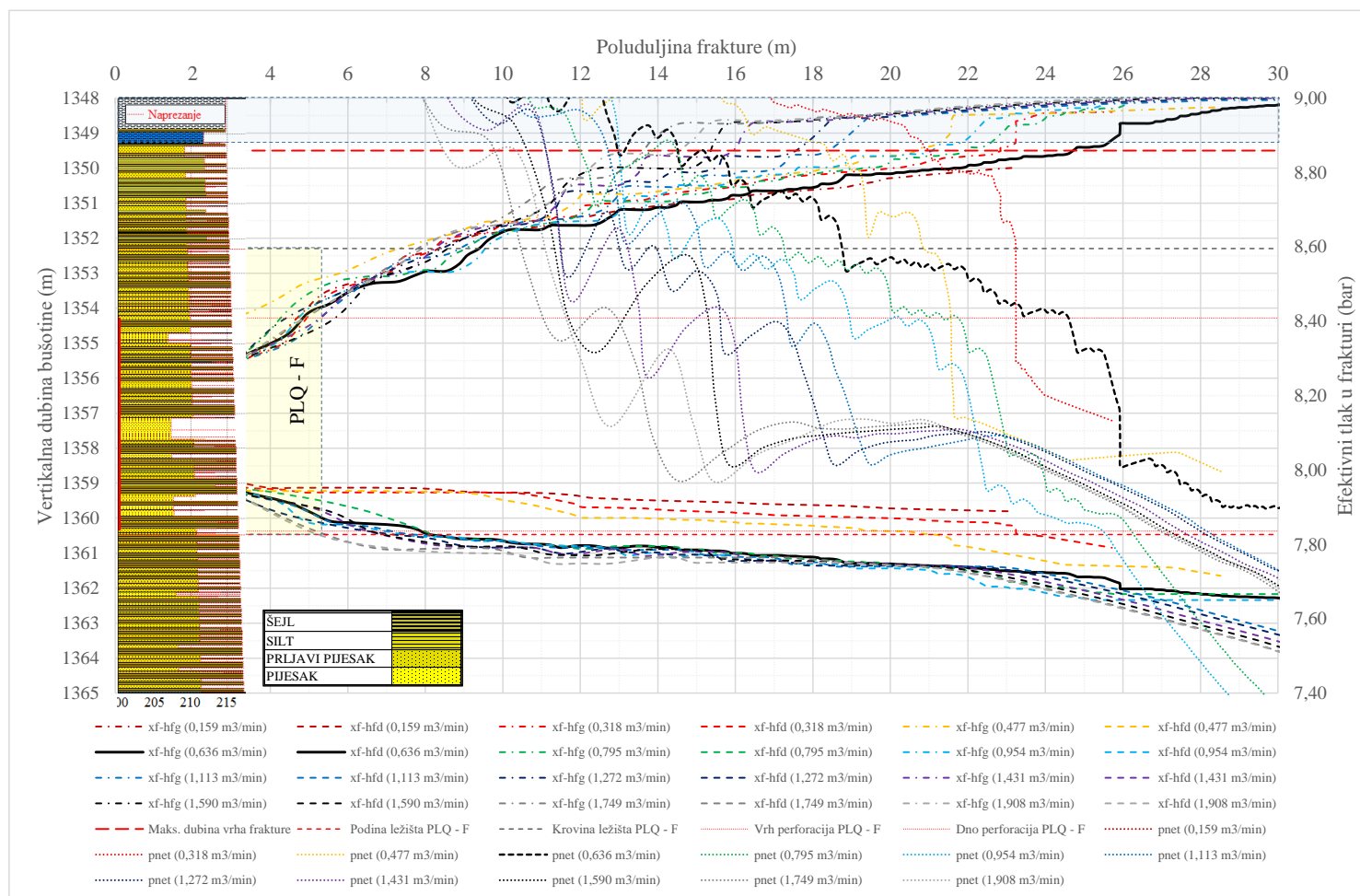
PIJESAK	PLQ - F	1359,50	7,55	0,153	207,52	19788	0,15	17,31	0,00318
PIJESAK	PLQ - F	1359,51	1,36	0,153	207,53	19788	0,15	17,31	0,00310
ŠEJL	PLQ - F	1359,66	14,71	0,159	216,57	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1359,70	4,26	0,153	207,56	19788	0,15	17,31	0,00306
PIJESAK	PLQ - F	1359,73	3,29	0,153	207,56	19788	0,15	17,31	0,00319
PIJESAK	PLQ - F	1359,76	2,52	0,153	207,56	19788	0,15	17,31	0,00331
ŠEJL	PLQ - F	1359,78	2,71	0,159	216,59	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - F	1359,85	6,20	0,153	207,58	19788	0,15	17,31	0,00348
PIJESAK	PLQ - F	1359,89	4,65	0,153	207,59	19788	0,15	17,31	0,00332
PIJESAK	PLQ - F	1359,93	3,68	0,153	207,59	19788	0,15	17,31	0,00320
ŠEJL	PLQ - F	1360,08	15,49	0,159	216,64	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1360,11	2,90	0,155	210,63	20495	0,20	19,04	0,00083
ŠEJL	PLQ - F	1360,29	17,81	0,159	216,67	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1360,32	2,52	0,155	210,66	20495	0,20	19,04	0,00104
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1360,41	8,91	0,155	210,67	20495	0,20	19,04	0,00178
ŠEJL	PLQ - F	1360,44	3,68	0,159	216,70	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1360,46	1,74	0,155	210,68	20495	0,20	19,04	0,00131
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - F	1360,47	0,97	0,155	210,68	20495	0,20	19,04	0,00116
ŠEJL	PLQ - intFG	1360,68	21,51	0,159	216,74	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1360,70	1,36	0,155	210,72	20495	0,20	19,04	0,00116
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1360,73	2,91	0,155	210,72	20495	0,20	19,04	0,00133
ŠEJL	PLQ - intFG	1360,91	18,03	0,159	216,77	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1360,99	8,14	0,155	210,76	20495	0,20	19,04	0,00194
ŠEJL	PLQ - intFG	1361,15	16,48	0,159	216,81	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1361,20	4,46	0,155	210,80	20495	0,20	19,04	0,00185
ŠEJL	PLQ - intFG	1361,43	23,65	0,159	216,86	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1361,51	7,75	0,155	210,84	20495	0,20	19,04	0,00152
ŠEJL	PLQ - intFG	1361,58	6,40	0,159	216,88	28269	0,25	21,92	0,00006

PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1361,64	6,59	0,155	210,86	20495	0,20	19,04	0,00142
ŠEJL	PLQ - intFG	1361,75	11,05	0,159	216,91	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1361,81	6,01	0,155	210,89	20495	0,20	19,04	0,00106
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1361,83	2,13	0,155	210,89	20495	0,20	19,04	0,00128
ŠEJL	PLQ - intFG	1361,89	5,81	0,159	216,93	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1361,95	6,20	0,155	210,91	20495	0,20	19,04	0,00166
ŠEJL	PLQ - intFG	1362,04	8,92	0,159	216,95	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1362,12	7,75	0,155	210,94	20495	0,20	19,04	0,00303
ŠEJL	PLQ - intFG	1362,13	0,78	0,159	216,97	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - intFG	1362,17	4,26	0,153	207,93	19788	0,15	17,31	0,00312
ŠEJL	PLQ - intFG	1362,18	0,78	0,159	216,97	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - intFG	1362,23	5,43	0,153	207,94	19788	0,15	17,31	0,00307
ŠEJL	PLQ - intFG	1362,24	0,97	0,159	216,99	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1362,30	5,62	0,155	210,97	20495	0,20	19,04	0,00278
ŠEJL	PLQ - intFG	1362,42	12,02	0,159	217,01	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1362,44	2,13	0,155	210,99	20495	0,20	19,04	0,00135
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1362,50	6,20	0,155	211,00	20495	0,20	19,04	0,00095
ŠEJL	PLQ - intFG	1362,56	5,81	0,159	217,04	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1362,61	4,46	0,155	211,01	20495	0,20	19,04	0,00075
ŠEJL	PLQ - intFG	1362,67	6,78	0,159	217,05	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1362,72	4,65	0,155	211,03	20495	0,20	19,04	0,00109
ŠEJL	PLQ - intFG	1362,84	11,63	0,159	217,08	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1362,89	5,62	0,155	211,06	20495	0,20	19,04	0,00111
ŠEJL	PLQ - intFG	1363,04	14,73	0,159	217,11	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1363,08	4,46	0,155	211,09	20495	0,20	19,04	0,00131
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1363,12	3,88	0,155	211,09	20495	0,20	19,04	0,00113
ŠEJL	PLQ - intFG	1363,18	6,01	0,159	217,13	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1363,20	1,94	0,155	211,11	20495	0,20	19,04	0,00092

ŠEJL	PLQ - intFG	1363,33	12,99	0,159	217,16	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1363,35	1,55	0,155	211,13	20495	0,20	19,04	0,00124
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1363,40	5,04	0,155	211,14	20495	0,20	19,04	0,00116
ŠEJL	PLQ - intFG	1363,48	8,33	0,159	217,18	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1363,53	4,65	0,155	211,16	20495	0,20	19,04	0,00170
ŠEJL	PLQ - intFG	1363,64	11,05	0,159	217,21	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - intFG	1363,69	5,43	0,153	208,17	19788	0,15	17,31	0,00309
ŠEJL	PLQ - intFG	1363,93	23,84	0,159	217,25	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1363,97	3,88	0,155	211,23	20495	0,20	19,04	0,00231
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1364,00	2,71	0,155	211,23	20495	0,20	19,04	0,00248
ŠEJL	PLQ - intFG	1364,03	2,91	0,159	217,27	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1364,10	7,56	0,155	211,25	20495	0,20	19,04	0,00170
ŠEJL	PLQ - intFG	1364,28	17,83	0,159	217,31	28269	0,25	21,92	0,00006
PIJESAK	PLQ - intFG	1364,36	7,75	0,153	208,27	19788	0,15	17,31	0,00326
ŠEJL	PLQ - intFG	1364,39	3,49	0,159	217,33	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1364,42	2,52	0,155	211,29	20495	0,20	19,04	0,00300
ŠEJL	PLQ - intFG	1364,59	16,86	0,159	217,36	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1364,67	7,95	0,155	211,33	20495	0,20	19,04	0,00084
ŠEJL	PLQ - intFG	1364,77	10,08	0,159	217,39	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1364,86	9,69	0,155	211,36	20495	0,20	19,04	0,00150
ŠEJL	PLQ - intFG	1364,99	12,41	0,159	217,42	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1365,04	5,43	0,155	211,39	20495	0,20	19,04	0,00221
ŠEJL	PLQ - intFG	1365,08	3,49	0,159	217,44	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1365,12	3,88	0,155	211,40	20495	0,20	19,04	0,00148
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1365,18	6,59	0,155	211,41	20495	0,20	19,04	0,00097
ŠEJL	PLQ - intFG	1365,23	4,85	0,159	217,46	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1365,26	3,30	0,155	211,43	20495	0,20	19,04	0,00155
ŠEJL	PLQ - intFG	1365,38	12,21	0,159	217,49	28269	0,25	21,92	0,00006

PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1365,45	6,78	0,155	211,45	20495	0,20	19,04	0,00071
ŠEJL	PLQ - intFG	1365,50	4,65	0,159	217,50	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1365,57	6,98	0,155	211,47	20495	0,20	19,04	0,00063
ŠEJL	PLQ - intFG	1365,66	8,72	0,159	217,53	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1365,72	6,20	0,155	211,50	20495	0,20	19,04	0,00136
ŠEJL	PLQ - intFG	1366,09	37,60	0,159	217,60	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1366,12	2,91	0,155	211,56	20495	0,20	19,04	0,00217
ŠEJL	PLQ - intFG	1366,20	7,75	0,159	217,62	28269	0,25	21,92	0,00006
PRLJAVI PIJESAK	PLQ - intFG	1366,28	7,95	0,155	211,58	20495	0,20	19,04	0,00062
ŠEJL	PLQ - intFG	1367,10	81,80	0,159	217,76	28269	0,25	21,92	0,00006

**7.9. PRILOG 9. Dijagram ravnotežnih odnosa geometrije frakture u funkciji veličine protoka prethodnice ležišta PLQ-F u bušotini SJ - Dir**



Slika 67. Dijagram ravnotežnih odnosa geometrije frakture u funkciji veličine protoka prethodnice ležišta PLQ-F bušotine SJ - Dir

## 8. ŽIVOTOPIS

### OSOBNI PODACI:

Ime i prezime: Mr. sc. Goran Lešković, dipl. ing.

Datum i mjesto rođenja: 10.06.1966., Zagreb

Adresa: Zelenjak 10, Ivanić Grad

Telefon: 00 385 1 3886 081

E-mail: goran.leskovic@ina.hr

### OBRAZOVANJE

2012. – 2020. Sveučilište u Zagrebu, RGN fakultet  
Poslijediplomski doktorski studij Naftnog rudarstva
1995. – 2003. Sveučilište u Zagrebu, RGN fakultet  
Poslijediplomski znanstveni studij naftnog rudarstva  
Akademski stupanj: Magistar tehničkih znanosti (mr. sc.)  
Polje: Rudarstvo, nafta i geološko inženjerstvo
1988. – 1994. Sveučilište u Zagrebu, RGN fakultet  
Diplomski studij, smjer: Naftno rudarstvo  
Zvanje: Dipl. ing. naftnog rudarstva

### PROFESIONALNO ISKUSTVO:

2019. – . INA d.d., Avenija Većeslava Holjevca 10, 10020 Zagreb, Hrvatska.
- Voditelj programa Sjeverni Jadran.
- Voditelj projekata istraživanja, razrade i izgradnje proizvodnih sustava na lokalitetu Sjeverni Jadran.
2012. – 2019. INA d.d., Avenija Većeslava Holjevca 10, 10020 Zagreb, Hrvatska.
- Direktor Službe inženjeringa proizvodnih sustava. Radno mjesto uključuje odgovornost za sveobuhvatne aktivnosti vezane za tehnologiju proizvodnje nafte i plina (2015.-2019.).
- Prethodna radna mjesta: Vodeći stručnjak za opremanje bušotina, te Specijalist tehnolog u proizvodnji nafte i plina. Nadležnosti u okviru ovih radnih mjesta obuhvaćaju dizajn podzemne i nadzemne opreme bušotina, te projektiranje i nadzor remontnih radova u bušotinama, kao i optimalizaciju i integrirano proizvodno modeliranje naftnih i plinskih polja korištenjem računalnih programa. Također, obuhvat poslova su i preporuke i specifikacije bušotinske proizvodne opreme za nabavu te je bio odgovorni projektant za proizvodno opremanje bušotina.
2011. – 2012. Hayan Petroleum Company (HPC), GTP Hayan, Syria.
- Rukovoditelj Službe upravljanja proizvodnim pogonima. Odgovoran za sveukupne aktivnosti na proizvodnim pogonima HPC-a.



2010. – 2011. INA d.d., Avenija Većeslava Holjevca 10, 10020 Zagreb, Hrvatska.  
Specijalist tehnolog u proizvodnji nafte i plina.  
Odgovorni projektant za proizvodno opremanje bušotina.
2003. – 2010. INA d.d., Poslovna jedinica Italija, Ravenna, Italija.  
Rukovoditelj Tehničkih radova. Odgovorni projektant za proizvodno opremanje bušotina. Odgovoran za sveukupne aktivnosti tijekom bušenja i proizvodnog opremanje bušotina Projekta Sjeverni Jadran.
1995. – 2003. INA d.d., Avenija Većeslava Holjevca 10, 10020 Zagreb, Hrvatska.  
Radi na različitim pozicijama, počevši kao Inženjer proizvodnje, a potom i Inženjer tehnolog na proizvodnim poljima, da bi prije prelaska na poslove vezane uz aktivnosti na lokalitetu Sjeverni Jadran obavljao poslove Glavnog inženjera za plinsku tehnologiju Sektora proizvodnje nafte i plina. Poslovi i odgovornosti vezani za to razdoblje bili su dizajn podzemne i nadzemne opreme plinskih i plinsko-kondenzatnih bušotina te projektiranje i nadzor remontnih radova na istim bušotinama. U svojstvu Glavnog inženjera zadužen je za projektiranje i optimalizaciju rada bušotinskog fonda i sabirno transportnog sustava plinskih i plinsko kondenzatnih polja.

#### POPIS RADOVA:

- 1 Lešković G. (2017): Procjena indeksa proizvodnosti plinskih bušotina opremljenih tehnikom "Frack Pack" – 2. dio. Nafta i plin, 151./2017.,45-65, Zagreb, Hrvatska.
- 2 Lešković G. (2017): Procjena indeksa proizvodnosti plinskih bušotina opremljenih tehnikom "Frack Pack" – 1. dio. Nafta i plin, 150./2017.,19-31, Zagreb, Hrvatska.
- 3 Lešković G. (2014): Frac Pack to maximize inflow performance - Privlaka field unconsolidated sands example. Annual Student Energy Conference, Zagreb, Hrvatska.
- 4 Lešković G. (2013): Pilot project of Frac Pack technology implementation on Stružec and Privlaka fields shallow reservoirs. Mature Based for New Solutions, SPE Conference, Visegrad, Mađarska.
- 5 Jovović, S., Bolarić, Ž., Lešković, G., Zadravec, D. (2006): Suvremeni tehnološki pristup izgradnji i opremanju proizvodnih bušotina na plinskom polju IKA, Nataplin, 61-85, Zagreb, Hrvatska.

#### USAVRŠAVANJE:

- Halliburton Well Completion Course, Đurđevac, Hrvatska, 1998.;
- Halliburton Well Stimulation Course, Đurđevac, Hrvatska, 1998.;
- Camco Gas Lift School, Đurđevac, Hrvatska, 1998.;
- Petroleum Engineering Summer School: "Petroleum Reservoir Management", Dubrovnik, Hrvatska, 1999.;
- Oil and Gas Teams: „How to Make Them Work”, OGCI, Zagreb, Hrvatska, 2001.;
- Petroleum Engineering Summer School: "Gas Production Engineering ", Hrvatska, 2002.;
- "Gas Production Engineering", OGCI, Calgary, Canada, 2002. ;
- "Well Design and Engineering", Petrex International, Aberdeen, Scotland, UK 2006.;
- "Engineer Desktop Manager Workflow Training", Petroskills – Halliburton, Zagreb, Hrvatska, 2012.

## VJEŠTINE:

Aktivna uporaba slijedećih računalnih programskih paketa:

- Microsoft (MS) Word, MS Excel, MS Access, MS PowerPoint, MS Outlook, MS Visio, MS Project;
- MS Visual Basic for Applications programski jezik;
- Wolfram Mathematica;
- Petroleum Experts Ltd. Integrated Production Modelling Software Suit IPM (PROSPER, GAP, MBAL, RESOLVE, PVTP i Open Server);
- IHS Perform (Nodal System Analysis Software);
- Schlumberger Completion and Production Optimization Engineering Suite (FracCADE, SandCADE, ProdCADE, CoilCADE and TDAS);
- Meyer Fracturing Software Suite (MFrac, MinFrac, MProd);
- Landmark Drilling and Completion Engineering Suite (Compass, Profile, StressCheck).

## STRANI JEZICI:

Engleski, aktivno u govoru i pismu (stupanj B2).

## ČLANSTVA U PROFESIONALNIM DRUŠTVIMA:

- **SPE** (Society of Petroleum Engineers);
- **HUNIG** (Hrvatsko udruga naftnih inženjera i geologa).