Modeliranje i analiza proizvodnog sustava bušotine na plinsko-kondenzatnom polju "Duboke Podravine"

Glibo, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:169:297005

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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



Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

MODELIRANJE I ANALIZA PROIZVODNOG SUSTAVA BUŠOTINE NA PLINSKO-KONDENZATNOM POLJU „DUBOKE PODRAVINE“

Diplomski rad

Tomislav Glibo

N241

Zagreb, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

MODELIRANJE I ANALIZA PROIZVODNOG SUSTAVA BUŠOTINE NA PLINSKO-KONDENZATNOM POLJU „DUBOKE PODRAVINE“

Tomislav Glibo

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Zadatak ovog diplomskog rada bio je modelirati proizvodni sustav vertikalne plinsko-kondenzatne bušotine i analizirati njene trenutne i buduće proizvodne mogućnosti korištenjem računalnog programa IPM Prosper. Bušotina se nalazi na jednom od plinsko-kondenzatnih polja „Duboke Podravine“ karakteriziranih visokim početnim ležišnim tlakovima i temperaturama te prisutnošću kiselih neugljikovodičnih komponenti u smjesi ležišnog fluida. Tijekom proizvodnog vijeka bušotine dolazi do prirodnog pada proizvodnje zbog smanjenja ležišnog tlaka i posljedično do sve većeg utoka slojne vode čime se javlja potreba za optimizacijom proizvodnog sustava i rudarskim radovima kako bi se ublažio pad proizvodnje te održala ili čak i povećala postojeća proizvodnja. Time se produljuje proizvodni vijek bušotine i ostvaruje veći konačni iscrpak ležišta. U radu je dan pregled temeljnih teoretskih postavki višefaznog protjecanja fluida u proizvodnom nizu i čvorišne analize proizvodnog sustava te su opisane geološke karakteristike ležišta i tehničke karakteristike bušotine. Prikazan je pregled proizvodnje bušotine od početka 1989. godine do današnjih dana s najbitnijim mjerenjima i remontnim radovima. U završnom dijelu postavljen je model proizvodnog sustava bušotine podešen prema posljednjim mjerenim podacima te je korišten za analizu trenutne proizvodnje i u analizi osjetljivosti za prognoziranje utjecaja promjene varijabli poput ležišnog tlaka, omjera slojne vode i plina, dinamičkog tlaka na ušću bušotine i unutarnjeg promjera proizvodnog niza na buduće proizvodne mogućnosti bušotine.

Ključne riječi: IPR krivulja, VLP krivulja, čvorišna analiza, modeliranje proizvodnog sustava, plinsko-kondenzatna bušotina, analiza osjetljivosti.

Završni rad sadrži: 98 stranica, 27 tablica, 58 slika i 39 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF

Pomoć pri izradi: Sonja Buti, dipl. ing., INA, d.d.

Ocjenjivači: Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF
Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF
Dr. sc. Lidia Hrnčević, izvanredna profesorica RGNF

Datum obrane: 21. veljače 2019., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Master's Thesis

MODELLING AND ANALYSIS OF WELL PRODUCTION SYSTEM IN GAS-CONDENSATE „DEEP PODRAVINA“ FIELD

Tomislav Glibo

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

Abstract

Objective od this Master's thesis was to model gas-condensate vertical well production system and to analyze current and future well production performance using the IPM Prosper program. The analyzed well is situated in one of „Deep Podravina“ gas-condensate fields characterized by very high initial reservoir pressures and temperatures and the presence of sour non-hydrocarbon components in the reservoir fluid mixture. During the production life of the well, production declines due to reservoir pressure depletion and increase of water influx. To mitigate production decline and to maintain, or even increase current production, there is a need for production system optimization and well workover, thus extending well production life and increasing ultimate reservoir recovery. In this thesis the summary of theoretical fundamentals of production tubing multi-phase fluid flow and production system nodal analysis are given. Moreover, geological characteristics of the reservoir and technical characteristics of the production well are described. The well production hystory summary since the beginning of production in 1989 to the present day with all significant well tests and workovers are presented. In the last section, the well production system model is set and matched to the last field test data. The model is used for current production analysis and in sensitivity analysis for forecasting effects of parameters change, like reservoir pressure, water-gas ratio, wellhead pressure and production tubing inside diameter, on future well production performance.

Keywords:	IPR curve, VLP curve, nodal analysis, well production system modelling, gas-condensate well, sensitivity analysis.
Thesis contains:	98 pages, 27 tables, 58 figures and 39 references.
Original in:	Croatian
Archived in:	Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb
Supervisors:	PhD Vladislav Brkić, Assistant Professor
Tech. assistance:	Sonja Buti, dipl. ing., INA, d.d.
Reviewers:	PhD Vladislav Brkić, Assistant Professor
	PhD Borivoje Pašić, Assistant Professor
	PhD Lidia Hrnčević, Associate Professor

Defence date: February 21, 2019, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

Zahvaljujem doc. dr. sc. Vladislavu Brkiću na prihvaćanju mentorstva i pomoći oko odabira teme diplomskog rada te na savjetima i primjedbama prilikom njegove izrade. Također, zahvaljujem kompaniji INA - Industrija nafte, d.d. na pristupu podacima i tehničkoj dokumentaciji potrebnoj za izradu ovoga rada te Sonji Buti, dipl. ing. na praktičnim savjetima prilikom rada u računalnom programu Prosper.

Najveću zahvalu dugujem svojim roditeljima i braći na moralnoj, financijskoj i svakoj drugoj potpori tijekom studija te posebnu zahvalu prijateljima na podršci te kolegama s kojima sam provodio vrijeme tijekom studiranja na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA I

POPIS TABLICA V

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I MJERNIH JEDINICA VII

POPIS KORIŠTENIH KRATICA X

1. UVOD 1

2. TEORETSKE OSNOVE VIŠEFAZNOG PROTOKA FLUIDA U BUŠOTINI I NODAL ANALIZA 3

2.1. GRADIJENT PADA TLAKA KOD VIŠEFAZNOG PROTJECANJA FLUIDA U BUŠOTINI 7

2.2. TEORIJA I PRIMJENA NODAL (ČVORIŠNE) ANALIZE 13

3. OSNOVNI PODACI O PLINSKO-KONDENZATNOM POLJU I BUŠOTINI X-1 18

3.1. OPIS I POVIJEST ISTRAŽIVANJA PLINSKO-KONDENZATNOG POLJA 18

3.2. GEOLOŠKI OPIS I KARAKTERISTIKE LEŽIŠTA „X“ 20

3.3. GEOLOŠKI PODACI BUŠOTINE X-1 22

3.4. TEHNIČKI PODACI I KONSTRUKCIJA BUŠOTINE X-1 23

4. POVIJEST PROIZVODNJE BUŠOTINE X-1 I PROVEDENI RUDARSKI (REMONTNI) RADOVI 27

4.1. PROIZVODNJA I STANJE BUŠOTINE X-1 OD POČETKA PROIZVODNJE DO KISELINSKE OBRADE 2009. GODINE 27

4.1.1. Početno proizvodno opremanje bušotine X-1 28

4.1.2. Rad bušotine na srednjem tlaku i s velikom depresijom na sloj 31

4.1.3. Stimulacija sloja bušotine X-1 kemijskom (kiselinskom) obradom 35

4.2. PROIZVODNJA BUŠOTINE X-1 NAKON KEMIJSKE OBRADE 2009. GODINE 39

4.3. KAPITALNI REMONT SLOJA I OPREME BUŠOTINE X-1 2016. GODINE....46

4.3.1. Analiza promjene promjera proizvodnog niza 47

4.3.2. Kapitalni remont opreme – ugradnja novog proizvodnog niza većeg promjera 55

4.3.3. Perforiranje novih gornjih proizvodnih intervala 58

4.3.4. Rezultati provedenih rudarskih radova 59

4.4. PROIZVODNJA I STANJE BUŠOTINE X-1 NAKON REMONTNIH RADOVA 2016. GODINE.....61

4.4.1. Perforiranje gornjeg intervala i kiselinska obrada sloja.....61

4.4.2. Kiselinsko pranje perforacija i kiselinska obrada sloja u kolovozu 2016. 64

4.4.3. Kiselinska obrada sloja i reperforiranje tijekom 2017. godine 64

5. MODELIRANJE PROIZVODNOG SUSTAVA TE ANALIZA TRENUTNIH I BUDUĆIH PROIZVODNIH MOGUĆNOSTI BUŠOTINE X-1.....70

5.1. TRENUTNO STANJE I PROIZVODNJA BUŠOTINE X-1.....70

5.2. MODELIRANJE PROIZVODNOG SUSTAVA BUŠOTINE X-1 I ANALIZA TRENUTNIH PROIZVODNIH MOGUĆNOSTI 72

5.2.1. Definiranje proizvodnog sustava bušotine X-1 73

5.2.2. Postavljanje PVT modela ležišnog fluida 74

5.2.3. Postavljanje IPR modela.....76

5.2.4. Unos tehničkih podataka o bušotini i ugrađenoj opremi.....79

5.2.5. Proračun VLP krivulje i podešavanje prema podacima ispitivanja bušotine...81

5.2.6. Analiza trenutnih proizvodnih mogućnosti bušotine X-1.....85

5.3. ANALIZA BUDUĆIH PROIZVODNIH MOGUĆNOSTI BUŠOTINE X-1.....86

6. ZAKLJUČAK.....93

7. POPIS LITERATURE 95

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Stvarna i idealna indikatorska (IPR) krivulja 4

Slika 2-2. Mogući načini poboljšanja proizvodnosti bušotine 5

Slika 2-3. Moguće strukture višefaznog protjecanja kapljevine i plina u vertikalnim bušotinama.....8

Slika 2-4. Mogući gubici tlaka u proizvodnom sustavu.....8

Slika 2-5. Ukupni gradijent tlaka i pojedine komponente u ovisnosti o protoku plina 12

Slika 2-6. Utjecaj unutarnjeg promjera proizvodnog niza na minimalni potrebni protok smjese.....12

Slika 2-7. Moguće čvorišne točke proizvodnog sustava.....13

Slika 2-8. Određivanje protočnog kapaciteta (radne točke) proizvodnog sustava 15

Slika 2-9. Proizvodni kapacitet sustava ograničen karakteristikama istoka.....16

Slika 2-10. Proizvodni kapacitet sustava ograničen karakteristikama utoka 17

Slika 3-1. Geološki profil (litostratigrafski stup) ležišta „X“.....22

Slika 3-2. Konstrukcija bušotine X-1.....24

Slika 3-3. Oprema ušća bušotine X-1 25

Slika 3-4. Fotografija tipične nadzemne opreme bušotina „Duboke Podravine“.....26

Slika 3-5. Sigurnosno-blokadna jedinica i sustav interventnog gušenja bušotine X-1.....26

Slika 4-1. Početno proizvodno opremanje bušotine X-1 od 1989. do 2016. godine 30

Slika 4-2. Dijagram rezultata testa protoka i testa porasta tlaka tijekom HDM-a 2008. godine 33

Slika 4-3. Trend kretanja proizvodnje plina i slojne vode te tlaka na ušću bušotine X-1 tijekom 2009. godine.....38

Slika 4-4. Trend kretanja proizvodnje plina i slojne vode te tlaka na ušću bušotine X-1 tijekom 2010. godine.....39

Slika 4-5. Dijagram rezultata mjerenja protoka (P_d - dinamički tlak) i porasta tlaka (P_s - statički tlak) tijekom HDM-a 2015. 41

Slika 4-6. Dinamički tlak i temperatura na ušću tijekom HDM-a 2015. 41

Slika 4-7. Trend kretanja proizvodnje bušotine X-1 tijekom 2014. i 2015. godine 45

Slika 4-8. Utjecaj promjene unutarnjeg promjera proizvodnog niza na kapacitet proizvodnog sustava 48

Slika 4-9. Odabir optimalnog promjera proizvodnog niza s obzirom na maksimalni protok 48

Slika 4-10. Utjecaj promjene unutarnjeg promjera proizvodnog niza na dinamički tlak na dnu bušotine 49

Slika 4-11. Radna točka sustava prije ugradnje većeg proizvodnog niza i perforiranja gornjih intervala 53

Slika 4-12. Utjecaj povećanja promjera proizvodnog niza na radnu točku sustava bez perforiranja gornjih intervala 53

Slika 4-13. Prognoza radne točke sustava nakon provedenih remontnih radova 55

Slika 4-14. Nova ugrađena proizvodna oprema bušotine X-1 nakon kapitalnog remonta opreme 2016. godine 57

Slika 4-15. Radna točka proizvodnog sustava bušotine X-1 prije i nakon remontnih radova 2016. godine 60

Slika 4-16. Dijagram karotažnih mjerenja bušotine X-1 na intervalu 3470 - 3285 m 63

Slika 4-17. Utjecaj broja (gustoće) perforacija na IPR krivulju 65

Slika 4-18. Određivanje optimalnog broja perforacija 66

Slika 4-19. Trend kretanja proizvodnje plina i slojne vode bušotine X-1 od kolovoza 2016. do svibnja 2018. godine 68

Slika 4-20. Trend kretanja saliniteta slojne vode pridobivene iz bušotine X-1 od siječnja 2017. do svibnja 2018. godine 69

Slika 5-1. Trenutno stanje bušotine X-1: ugrađena proizvodna oprema i raskriveni proizvodni intervali 71

Slika 5-2. Definiranje proizvodnog sustava bušotine X-1 73

Slika 5-3. Komponentni sastav ležišnog fluida dobiven proračunom iz jednadžbe stanja u programu Prosper 75

Slika 5-4. Fazni dijagram ležišnog fluida dobiven jednažbom stanja 75

Slika 5-5. Ulazni podaci potrebni za proračun IPR krivulje 77

Slika 5-6. Ulazni podaci potrebni za modeliranje IPR krivulje metodom *Petroleum Experts* 78

Slika 5-7. Ulazni podaci potrebni za modeliranje mehaničkog i geometrijskog skina 78

Slika 5-8. IPR krivulja bušotine X-1 79

Slika 5-9. Unos podataka o trajektoriji bušotine X-1 79

Slika 5-10. Unos podataka o ugrađenoj proizvodnoj opremi bušotine X-1 80

Slika 5-11. Unos izmjerenog geotermalnog gradijenta i toplinskih kapaciteta fluida 81

Slika 5-12. Unos mjerenih podataka tijekom ispitivanja bušotine X-1 81

Slika 5-13. Rezultati usporedbe korelacija za proračun VLP krivulje 82

Slika 5-14. Rezultati podešavanja korelacije *Petroleum Experts 5* prema podacima mjerenja 83

Slika 5-15. Trenutna radna točka proizvodnog sustava bušotine X-1 84

Slika 5-16. Utjecaj smanjenja unutarnjeg promjera proizvodnog niza uz trenutne uvjete ležišnog tlaka i WGR-a 87

Slika 5-17. Utjecaj smanjenja ležišnog tlaka i WGR-a na proizvodni kapacitet bušotine 87

Slika 5-18. Utjecaj smanjenja dinamičkog tlaka na ušću bušotine pri trenutnim uvjetima ležišnog tlaka i WGR-a 89

Slika 5-19. Utjecaj smanjenja dinamičkog tlaka na ušću bušotine pri ležišnom tlaku od 105 bar i WGR-u od 700 cm^3/m^3 89

Slika 5-20. Utjecaj smanjenja dinamičkog tlaka na ušću bušotine pri ležišnom tlaku od 100 bar i WGR-u od 800 cm^3/m^3 90

Slika 5-21. Utjecaj smanjenja dinamičkog tlaka na ušću bušotine pri ležišnom tlaku od 90 bar i WGR-u od 900 cm^3/m^3 90

Slika 5-22. Utjecaj smanjenja dinamičkog tlaka na ušću bušotine pri ležišnom tlaku od 85 bar i WGR-u od 950 cm^3/m^3 91

Slika 5-23. Utjecaj smanjenja dinamičkog tlaka na ušću bušotine pri ležišnom tlaku od 80 bar i WGR-u od 1000 cm^3/m^3 91

POPIS TABLICA

Tablica 1-1. Ukupne rezerve prirodnog plina i prosječna dnevna proizvodnja plina i kondenzata za 2016. i 2017. godinu u Republici Hrvatskoj.....2

Tablica 2-1. Okvirna skala vrijednosti *skin* faktora.....5

Tablica 2-2. Udio pojedinih komponenti u ukupnom gubitku tlaka u proizvodnom nizu.....9

Tablica 3-1. Početne vrijednosti ležišnih parametara polja „X“ 18

Tablica 3-2. Pridobive rentabilne rezerve plina i kondenzata te preostale godine rentabilne proizvodnje polja „X“ 19

Tablica 3-3. Sastav ležišnog fluida plinsko-kondenzatnog polja „X“ 20

Tablica 4-1. Prosječne početne vrijednosti ležišnih parametara.....28

Tablica 4-2. Izmjereni statički i dinamički tlakovi tijekom HDM-a od 2004. do 2008. godine.....31

Tablica 4-3. Dinamički gradijent tlaka bušotine X-1 izmjeren tijekom HDM-a 2008. godine 32

Tablica 4-4. Mjerenje proizvodnih količina bušotine X-1 2008. godine 32

Tablica 4-5. Rezultati mjerenja dinamičkog gradijenta tlaka nakon kemijske obrade 2009.....37

Tablica 4-6. Plan hidrodinamičkog mjerenja 2015. godine 40

Tablica 4-7. Izmjereni dinamički gradijent tlaka tijekom HDM-a 2015. godine.....40

Tablica 4-8. Izmjereni proizvodni parametri visokotlačnim separatorom na bušotini X-1 42

Tablica 4-9. Mjerenje proizvodnih količina mjernim separatorom na plinskoj stanici 42

Tablica 4-10. Rezultati mjerenja saliniteta više uzoraka slojne vode.....43

Tablica 4-11. Izmjerena fizikalno-kemijska svojstva slojne vode 2015. godine.....43

Tablica 4-12. Rezultati analize utjecaja promjene promjera proizvodnog niza u kombinaciji s perforiranjem gornjih intervala 54

Tablica 4-13. Prikaz postojećih i novih proizvodnih intervala.....58

Tablica 4-14. Karakteristike perforatora i izrađenih perforacija 58

Tablica 4-15. Prikaz rezultata rudarskih radova u kolovozu 2016. 64

Tablica 4-16. Prikaz rezultata kiselinske obrade sloja u travnju 2017. godine 64

Tablica 4-17. Prikaz rezultata dvostrukog reperforiranja postojećih proizvodnih intervala u kolovozu 2017. godine 66

Tablica 4-18. Prikaz rezultata repreforiranja postojećeg proizvodnog intervala u listopadu 2017. godine 67

Tablica 5-1. Odstupanje postavljenog modela proizvodnog sustava bušotine od mjerenih podataka 84

Tablica 5-2. Prikaz smanjenja ležišnog tlaka i povećanja proizvodnje slojne vode u odnosu na prethodna razdoblja 85

Tablica 5-3. Radne točke dobivene analizom utjecaja smanjenja dinamičkog tlaka na ušću bušotine uz smanjenje ležišnog tlaka i povećanje WGR-a 92

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI MJERNIH JEDINICA

B	obujamski koeficijent, m^3/m^3
C	empirijska konstanta (faktor), -
CGR	omjer kondenzata i plina, m^3/m^3
d	unutarnji promjer cijevi, m
dP/dH	dinamički gradijent tlaka bušotine, bar/m
dp/dL	gradijent pada tlaka, bar/m
$(dp/dL)_A$	komponenta pada tlaka zbog akceleracije, bar/m
$(dp/dL)_H$	komponenta pada tlaka zbog gravitacije (hidrostatička), bar/m
$(dp/dL)_F$	komponenta pada tlaka zbog trenja, bar/m
d_t	unutarnji promjer proizvodnog niza (tubinga), m
e	baza prirodnog logaritma (2,71828)
f_m	višefazni faktor trenja, -
g	akceleracija sile teže (9,80665 m/s^2)
GLR	omjer plina i kapljevine, m^3/m^3
h	ukupna debljina ležišta, m
H_b	dubina bušotine, m
h_{ef}	efektivna debljina ležišta, m
J	indeks proizvodnosti bušotine, m^3/dan/bar
k	efektivna propusnost ležišne stijene za proizvodni fluid, m^2
M_a	molarna masa zraka (28,966 g/mol)
N	ukupan broj perforacija, -
p_a	tlak prstenastog prostora, bar
P_d	dinamički tlak, bar
p_R	ležišni tlak, bar
$\overline{p_R}$	srednji ležišni tlak, bar
P_s	statički tlak, bar
p_{sc}	standardni tlak (101 325 Pa)
p_{sep}	tlak separatora, bar
p_{wf}	dinamički tlak na dnu bušotine, bar
p_{wh}	dinamički tlak na ušću bušotine, bar
q	trenutna proizvodnja bušotine, m^3/dan

q_c	proizvodnja kondenzata, m^3/dan
q_g	proizvodnja plina, m^3/dan
q_w	proizvodnja slojne vode, m^3/dan
R	opća plinska konstanta (8,314 J mol^{-1} K^{-1})
S	ukupni *skin* faktor, -
s	eksponent koji se odnosi na hidrostatsku komponentu gradijenta pada tlaka, m^{-1}
S'	eksperimentalno dobivena konstanta ovisna o geometriji cijevi, -
S_c	*skin* faktor zbog djelomičnog raskrivanja sloja, -
S_d	mehanički *skin* faktor, -
S_p	*skin* faktor zbog nesavršenosti perforiranja, -
S_w	zasićenje slojnom vodom, -
S_θ	*skin* faktor zbog otklona bušotine, -
$\bar{T}$	srednja temperatura, K
T_R	ležišna temperatura, °C
T_{sc}	standardna temperatura (15 °C = 288 K)
t_{sep}	temperatura separatora, °C
t_{wh}	dinamička temperatura na ušću bušotine, °C
v_e	granična brzina protoka smjese fluida, m/s
v_{gl}	minimalna (kritična) brzina protoka plina za iznošenje kapljevine, m/s
v_{gw}	minimalna (kritična) brzina protoka plina za pokretanje slojne vode, m/s
w	maseni protok pijeska, kg/dan
WGR	omjer slojne vode i plina, m^3/m^3
$\bar{Z}$	srednji faktor stlačivosti plina, -
γ_g	relativna gustoća plina, -
γ_{smjese}	relativna gustoća smjese fluida, -
Δp	depresija na ležište, bar
Δp_{perf}	pad tlaka u perforacijama, bar
Δp_R	pad tlaka pri protjecanju kroz ležište, bar
Δp_s	pad tlaka u pribušotinskoj zoni zbog *skin* efekta, bar
Δp_t	gubitak tlaka u proizvodnom nizu (tubingu), bar
Δp_{uk}	ukupni gubitak tlaka u proizvodnom sustavu bušotine, bar
Δp_{wh}	promjena dinamičkog tlaka na ušću bušotine, bar

Δq_c	promjena proizvodnje kondenzata, m^3/dan
Δq_g	promjena proizvodnje plina, m^3/dan
μ	dinamička viskoznost fluida, Pa·s
π	Ludolfov broj (3,14159)
ρ_g	gustoća plina, kg/m^3
ρ_l	gustoća slojne vode/kondenzata, kg/m^3
ρ_m	gustoća smjese fluida, kg/m^3
ρ_w	gustoća slojne vode, kg/m^3
σ_{lg}	površinska napetost slojna voda/plin ili kondenzat/plin, N/m
Φ	poroznost ležišne stijene, -

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

AOF	maksimalni teoretski kapacitet proizvodnje (*engl. Absolute Open Flow*)
API	Američki naftni institut (*engl. American Petroleum Institute*)
CGR	omjer kondenzata i plina (*engl. Condensate-Gas Ratio*)
DST	ispitivanje sloja (*engl. Drill Stem Test*)
DSV	dubinski sigurnosni ventil
EU	vanjsko ojačanje spojnice (*engl. External Upset*)
GLR	omjer plina i kapljevine (*engl. Gas-Liquid Ratio*)
HDM	hidrodinamičko mjerenje
HF	hidrauličko frakturiranje
IPM	programski paket za modeliranje i analizu proizvodnog sustava (*engl. Integrated Production Modelling*)
IPR	indikatorska krivulja (*engl. Inflow Performance Relationship*)
ID	unutarnji promjer (*engl. Inside Diameter*)
KPP	kiselinsko pranje perforacija
KRO	kapitalni remont opreme
KRS	kapitalni remont sloja
Mboe	tisuću barela ekvivalentne nafte (*engl. barrel of oil equivalent*)
MMboe	milijun barela ekvivalentne nafte
OD	vanjski promjer (*engl. Outside Diameter*)
PVT	svojstva ležišnog fluida (*engl. Pressure - Volume – Temperature*)
RSH	merkaptani
SPF	gustoća perforacija (*engl. Shots per Foot*)
SSSV	dubinski sigurnosni ventil kontroliran s površine (*engl. Surface-Controlled Subsurface Safety Valve*)
TPR	krivulja vertikalnog podizanja (*engl. Tubing Performance Relationship*)
VLP	krivulja vertikalnog podizanja (*engl. Vertical Lift Performance*)
VTS	visokotlačni separator
WGR	omjer slojne vode i plina (*engl. Water-Gas Ratio*)
2P	dokazane i vjerojatne rezerve (*engl. Proved and Probable*)

1. UVOD

Tijekom eksploatacije naftnih i plinskih polja s vremenom dolazi do prirodnog pada proizvodnje kao posljedice smanjenja ležišnog tlaka uslijed proizvodnje fluida iz ležišta, sve većeg utoka slojne vode, odnosno povećanja udjela vode u proizvedenom fluidu, čepljenja perforacija itd. Kako bi se prirodni pad proizvodnje ublažio, tj. usporio i postigao veći konačan iscrpak ležišta, javlja se potreba za rudarskim radovima u bušotinama, odnosno remontnim i stimulacijskim radovima poput kapitalnog remonta opreme (ugradnja nove proizvodne opreme ili prenamjena bušotine), tekućeg remonta opreme (održavanje/zamjena postojeće ugrađene opreme) i kapitalnog remonta sloja (kemijske/kiselinske obrade, hidrauličko frakturiranje, perforiranje novih intervala i reperforiranje postojećih proizvodnih intervala). Na taj se način optimizira proizvodnja svake bušotine, a time i cijeloga polja, tj. proizvodnja ostaje i dalje isplativa, odnosno ekonomski održiva. Upravo zbog toga je potrebno stalno praćenje i analiza proizvodnog sustava kako bi se na vrijeme uočili nedostaci ili kritične točke i optimizirao proizvodni sustav.

U diplomskom radu analizira se proizvodnja i proizvodni sustav vertikalne plinsko-kondenzatne bušotine X-1 na jednom od plinsko-kondenzatnih polja tzv. „Duboke Podravine“ kod koje se, u zadnje vrijeme, sve više povećava udio slojne vode u proizvedenom fluidu uz prirodni pad ležišnog tlaka. Dan je opis i povijest proizvodnog polja te osnovni geološki podaci o ležištu te je prikazana povijest proizvodnje bušotine na temelju dostupnih podataka sa svim izvedenim rudarskim radovima i njihovim rezultatima. Provedeno je modeliranje i analiza proizvodnog sustava i trenutne proizvodnje, odnosno proizvodnih mogućnosti te predviđanje budućih proizvodnih mogućnosti s obzirom na promjenu varijabli proizvodnog sustava. Za analizu je korišten računalni program Prosper, dio programskog paketa IPM (*engl. Integrated Production Modelling*) tvrtke Petroleum Experts, Ltd., koji se koristi najčešće za analizu trenutne proizvodnje, modeliranje dizajna (opremanja) bušotine i optimizaciju proizvodnje (Petroleum Experts, 2018).

Prema podacima iz 2017. godine domaća proizvodnja plina trenutno zadovoljava 50% potreba tržišta u Republici Hrvatskoj, od čega najveći dio čini proizvodnja iz kopnenih plinskih polja (najviše polja „Duboke Podravine“). Prirodni pad proizvodnje plina prisutan je i na kopnenim poljima i na poljima na sjevernom Jadranu. U tablici 1-1. prikazane su ukupne rezerve i proizvodnja prirodnog plina i kondenzata 2016. i 2017. godine. Od 2016.

godine prisutan je trend rasta (ublažavanja pada) proizvodnje plina na kopnenim poljima u Republici Hrvatskoj, pa je 2017. godine prosječna dnevna proizvodnja plina s kopnenih polja dosegla razinu od $2{,}18 \cdot 10^6$ m^3/dan (13,6 Mboe/dan), odnosno 3% više u odnosu na 2016. godinu, uglavnom kao rezultat puštanja u proizvodnju novih plinskih polja u Međimurju. Na sjevernom Jadranu proizvodnja plina se nastavlja smanjivati, no manjim intenzitetom. Smanjenje proizvodnje plina iz plinskih polja na sjevernom Jadranu 2017. u odnosu na 2016. godinu iznosi 17%. Ukupan pad proizvodnje plina u navedenom razdoblju iznosi 5%, odnosno prosječna dnevna proizvodnja plina 2017. godine iznosi $3{,}41 \cdot 10^6$ m^3/dan (21,3 Mboe/dan) (Godišnje izvješće INA, d.d., 2017).

Tablica 1-1. Ukupne rezerve prirodnog plina i prosječna dnevna proizvodnja plina i kondenzata za 2016. i 2017. godinu u Republici Hrvatskoj (Godišnje izvješće INA, d.d., 2017)

Kopno + more	2016.	2017.
Rezerve prirodnog plina 2P (dokazane + vjerojatne) m^3 (MMboe)	$15{,}7 \cdot 10^9$ (98)	$10{,}7 \cdot 10^9$ (67)
Prosječna dnevna proizvodnja kondenzata m^3/dan (Mboe/dan)	304 000 (1,9)	288 000 (1,8)
Prosječna dnevna proizvodnja prirodnog plina m^3/dan (Mboe/dan)	$3{,}59 \cdot 10^6$ (22,4)	$3{,}41 \cdot 10^6$ (21,3)

2. TEORETSKE OSNOVE VIŠEFAZNOG PROTOKA FLUIDA U BUŠOTINI I NODAL ANALIZA

Retrogradno plinsko-kondenzatno ležište klasificira se na temelju faznog dijagrama smjese ležišnog fluida na kojemu se vrijednost temperature ležišta nalazi između vrijednosti kritične temperature smjese i krikondenterme, dok je početni ležišni tlak veći ili jednak tlaku rosišta. Tijekom proizvodnje iz takvih ležišta dolazi do pada ležišnog tlaka, a time i do pojave retrogradne kondenzacije, odnosno pojave kondenzata u ležištu i proizvodnom nizu (Čikeš, 2015).

Najvažniji pokazatelj trenutnih performansi (proizvodnih mogućnosti) proizvodne bušotine jest indeks proizvodnosti (*engl. productivity index*) koji je definiran kao odnos trenutne proizvodnje i potisnog tlaka (depresije na ležište), tj. razlike između ležišnog i dinamičkog tlaka na dnu bušotine kako je prikazano jednadžbom 2-1 (Brkić, 2017a):

$$J = \frac{q}{p_{R-}p_{wf}} = \frac{q}{\Delta p} \tag{2-1}$$

gdje su:

J - indeks proizvodnosti bušotine, m^3/dan/bar

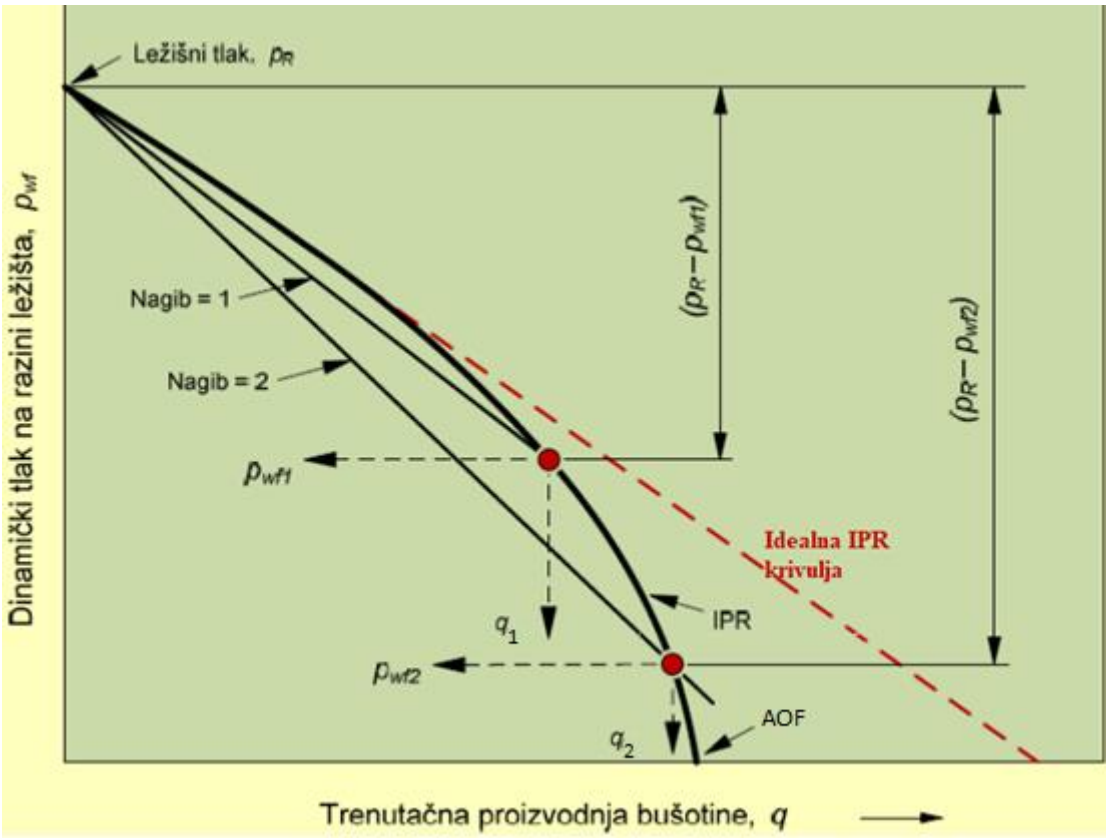
q - trenutna proizvodnja bušotine, m^3/dan

p_R - ležišni tlak, bar

p_{wf} - dinamički tlak na dnu bušotine, bar

Δp - depresija na ležište, bar.

Što je indeks proizvodnosti veći, veći je kapacitet proizvodnje za zadanu depresiju. Indeks proizvodnosti se koristi i za predviđanje kako promjena dinamičkog tlaka na dnu bušotine utječe na proizvodnju, a ovisi o svojstvima ležišta (propusnost i debljina ležišta), svojstvima fluida (viskoznost), geometriji protjecanja (drenažni radijus i radijus bušotine) i stupnju oštećenja pribušotinske zone (*skin*). Grafički prikaz indeksa proizvodnosti predstavlja indikatorska ili IPR krivulja (*engl. Inflow Performance Relationship*), odnosno krivulja utoka fluida iz ležišta u bušotinu. Prema Golanu i Whitsonu (1985), indikatorska (IPR) krivulja definira odnos protoka i dinamičkog tlaka na dnu bušotine u određenom vremenu kako je prikazano na slici 2-1.

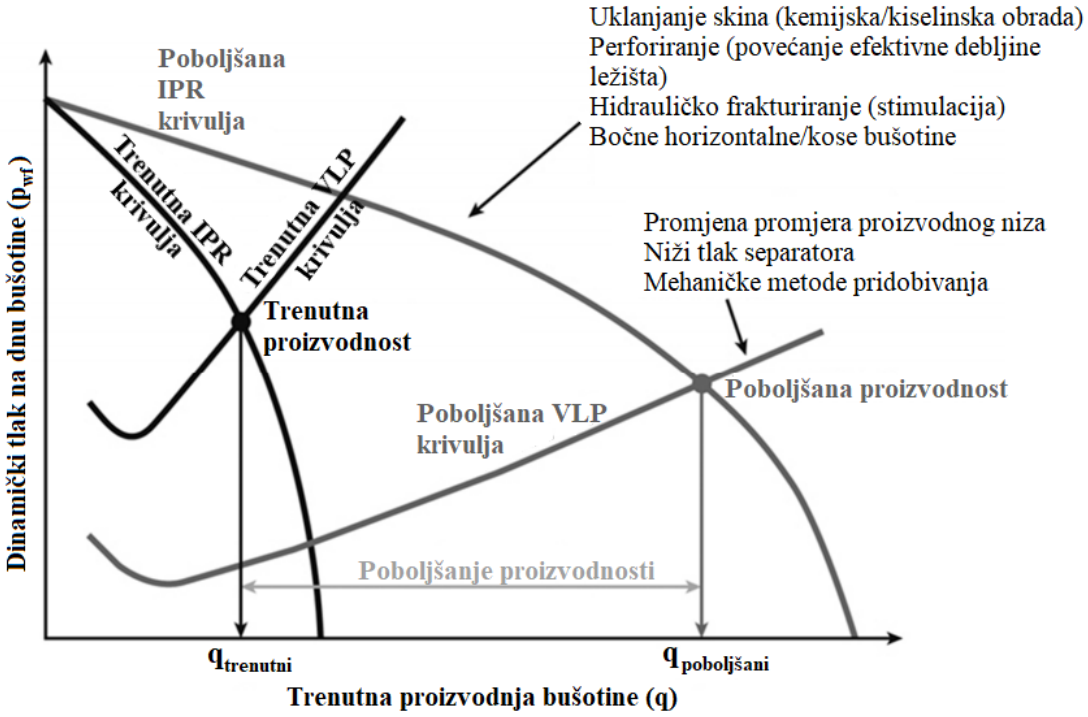


Slika 2-1. Stvarna i idealna indikatorska (IPR) krivulja (Čikeš, 2015)

Još jedan pokazatelj mogućnosti (potencijala) proizvodne bušotine jest maksimalni teoretski kapacitet proizvodnje (*engl. AOF – Absolute Open Flow*) koji bi bio ostvaren na dubini sredine perforacija kada bi dinamički tlak na dnu bušotine bio jednak nuli, a ovisi o ležišnom tlaku, propusnosti i efektivnoj debljini ležišta te drugim čimbenicima (Perić, 2007). Jedina varijabla na koju se može utjecati s ciljem poboljšanja proizvodnosti bušotine jest *skin* faktor (S) kojega se može smanjiti ili čak potpuno ukloniti obradom stijena ležišta odgovarajućom kiselinom, u slučaju da je prouzročen oštećenjem, tj. smanjenjem propusnosti pribušotinske zone, zatim reperforiranjem, ako je uzrok nedovoljan broj (gustoća) perforacija, ili perforiranjem novih intervala u slučaju djelomičnog raskrivanja ležišta (parcijalne penetracije) dok se hidrauličkim frakturiranjem postiže i negativna vrijednost *skina* (Čikeš, 2015). Okvirna skala vrijednosti *skin* faktora dana je u tablici 2-1., a mogući načini poboljšanja proizvodnosti bušotine prikazani su na slici 2-2., gdje VLP (*engl. Vertical Lift Performance*) krivulja predstavlja krivulju dinamičkih tlakova, odnosno krivulju vertikalnog podizanja fluida iz bušotine.

Tablica 2-1. Okvirna skala vrijednosti *skin* faktora (Brkić, 2017b)

Vrijednost *skin* faktora	**Opis**
S < 0	stimulirana bušotina (ležište)
S ≈ -3	limit kemijske obrade
S ≈ -4	uspješno hidrauličko frakturiranje
S ≈ -5,5	najniža moguća vrijednost
S > 0	oštećena pribušotinska zona
S ≈ 1-2	umjereno oštećenje pribušotinske zone
S ≈ 5	značajno oštećenje pribušotinske zone
S > 10	mehanički problem u bušotini



Slika 2-2. Mogući načini poboljšanja proizvodnosti bušotine (Brkić, 2017a)

Skin faktor je uzročnik dodatnog pada tlaka u pribušotinskoj zoni koji se definira sljedećom jednadžbom (Brkić, 2017b):

$$\Delta p_S = S \frac{qB\mu}{2\pi k h_{ef}} \tag{2-2}$$

gdje su:

Δp_s - pad tlaka u pribušotinskoj zoni zbog *skin* efekta, bar

S - *skin* faktor, -

q - trenutna proizvodnja bušotine, m^3/dan

B - obujamski koeficijent, m^3/m^3

μ - dinamička viskoznost fluida, Pa·s

π - Ludolfov broj (3,14159)

k - efektivna propusnost ležišne stijene za proizvodni fluid, m^2

h_{ef} - efektivna debljina ležišta, m.

Ukupan *skin* efekt sastoji se od sljedećih komponenti (Brkić, 2017b):

a) *skin* efekt prouzročen smanjenjem propusnosti (oštećenjem) pribušotinske zone isplakom, cementnom kašom, itd. (klasični, tj. mehanički skin), S_d,
b) *skin* efekt prouzročen djelomičnim raskrivanjem ležišta i/ili otklonom kanala bušotine (geometrijski skin), $S_{c+\theta}$,
c) *skin* efekt prouzročen nesavršenim perforiranjem, S_p,
d) *pseudoskinovi* prouzročeni turbulencijom (ne-Darcyjev protok), nakupljanjem kondenzata u pribušotinskoj zoni (kod retrogradnih plinsko-kondenzatnih ležišta s tlakom ispod tlaka rosišta), čepljenjem perforacija (kamenac, parafin), smanjenjem relativnih propusnosti uslijed višefaznog protoka, itd.

Dakle, postoje 2 mogućnosti poboljšanja indeksa proizvodnosti:

1) stimulacija sloja bušotine i
2) povećanje depresije na proizvodni sloj.

Depresija se može povećati smanjenjem gubitaka tlaka u proizvodnom sustavu od dna bušotine do separatora optimizacijom promjera proizvodnog niza, uklanjanjem nepotrebnih restrikcija protoka, otvaranjem ili povećanjem promjera sapnice i/ili smanjenjem tlaka separatora (niži tlak sustava). No, kod bušotina koje proizvode s velikom depresijom na sloj može doći do dotoka krutih čestica i konusiranja vode te se stimulacijom smanjuje potrebna depresija za željenu proizvodnju, odnosno proizvodnja postaje ekonomski isplativija (Čikeš, 2015).

2.1. GRADIJENT PADA TLAKA KOD VIŠEFAZNOG PROTJECANJA FLUIDA U BUŠOTINI

U slučaju višefaznog protjecanja fluida, odnosno prirodnog plina, slojne vode i plinskog kondenzata, od dna bušotine do površine, analiza gradijenta pada tlaka, odnosno gubitka tlaka u uzlaznom nizu cijevi po jedinici duljine, postaje mnogo složenija nego što je to kod jednofaznog protjecanja. Kod protjecanja više faza gradijent pada tlaka povećava se za isti maseni protok i različiti fluidi se, uslijed razlike u gustoći, mogu razdvojiti te protjecati različitim brzinama u proizvodnom nizu, a između plinske i kapljevite faze može se stvoriti oštra međupovršina. Također, za smjesu fluida vrlo je teško točno odrediti gustoću, brzinu protjecanja i viskoznost (Čikeš, 2015).

Za proračun gradijenta tlaka nužno je poznavati vrijednosti parametara, odnosno varijabli višefaznog protoka koje definiraju uvjete protjecanja: brzina protjecanja, gustoća i viskoznost smjese, površinska napetost između faza te zaostajanje kapljevine (*engl. liquid holdup)* odnosno klizanje plina (*engl. gas holdup*). Općenita jednadžba gradijenta tlaka sastoji se od tri komponente, a dana je izrazom 2-3 (Čikeš, 2015):

$$\frac{dp}{dL} = \left(\frac{dp}{dL}\right)_A + \left(\frac{dp}{dL}\right)_H + \left(\frac{dp}{dL}\right)_F \tag{2-3}$$

gdje su:

$\frac{\mathrm{dp}}{\mathrm{dL}}$ - gradijent pada tlaka (gubitak tlaka po jedinici duljine), bar/m

$\left(\frac{\mathrm{dp}}{\mathrm{dL}}\right)_{\mathrm{A}}$ - komponenta pada tlaka zbog akceleracije, bar/m

$\left(\frac{\mathrm{dp}}{\mathrm{dL}}\right)_{\mathrm{H}}$ - komponenta pada tlaka zbog gravitacije (hidrostatička komponenta), bar/m

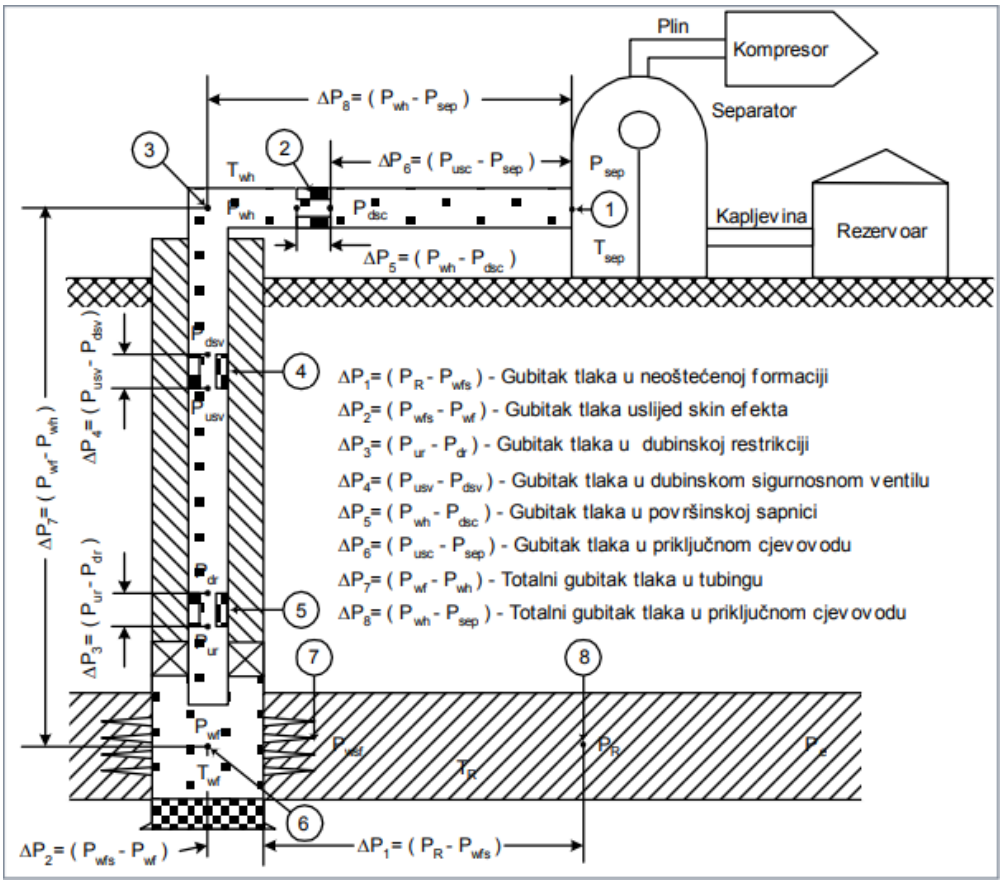
$\left(\frac{\mathrm{dp}}{\mathrm{dL}}\right)_{\mathrm{F}}$ - komponenta pada tlaka zbog trenja, bar/m.

Pri istovremenom protjecanju više fluida različitih fizikalnih svojstava kroz proizvodni niz (tubing), pojavljuje se širok raspon mogućih oblika (režima) protjecanja (slika 2-3.) koji odražavaju distribuciju svake faze u odnosu na ostale. Protjecanje ležišnog fluida iz ležišta na površinu zahtijeva određenu energiju za svladavanje otpora protjecanju,

odnosno trenja, pri čemu dolazi do pada (gubitaka) tlaka. Mogući gubici tlaka u proizvodnom sustavu prikazani su na slici 2-4.



Slika 2-3. Moguće strukture višefaznog protjecanja kapljevine i plina u vertikalnim bušotinama (Bratland, 2013)



Slika 2-4. Mogući gubici tlaka u proizvodnom sustavu (Brkić, 2017a)

Samo na podizanje fluida s dna bušotine na površinu može biti utrošeno čak 80% od ukupnog gubitka tlaka u cjelokupnom proizvodnom sustavu jedne bušotine što proizvodni niz (tubing) čini jednom od najvažnijih komponenti sustava. Udjeli pojedinih komponenti u ukupnom gubitku tlaka u proizvodnom nizu prikazani su u tablici 2-2. Gustoća fluida u naftnim bušotinama obično je znatno veća nego u plinskim pa je, s obzirom na to da hidrostatička komponenta ovisi o zaostajanju kapljevine, najvažnija varijabla koju treba vrjednovati koeficijent zaostajanja kapljevine. Za razliku od naftnih, u plinskim bušotinama je gustoća fluida manja, no plin protječe velikom brzinom što uzrokuje veće gubitke tlaka zbog trenja u proizvodnom nizu te je potrebno dobro poznavati hrapavost cijevi za određivanje faktora trenja (Čikeš, 2015).

Tablica 2-2. Udio pojedinih komponenti u ukupnom gubitku tlaka u proizvodnom nizu (Beggs, 2003)

Komponenta gubitka tlaka	**Udio u ukupnom gubitku tlaka u proizvodnom nizu (%)**	
	Naftne bušotine	**Plinske bušotine**
Hidrostatička (H)	70 do 90	20 do 50
Trenje (F)	10 do 30	30 do 70
Akceleracija (A)	0 do 10	0 do 10

Ukupni gubitak tlaka u proizvodnom sustavu bušotine dan je izrazom 2-4, a gubitak tlaka u proizvodnom nizu izrazom 2-5 (Brkić, 2017a):

$$\Delta p_{uk} = p_R - p_{sep} \tag{2-4}$$

gdje su:

Δp_{uk} - ukupni gubitak tlaka u proizvodnom sustavu bušotine, bar

p_R - ležišni tlak, bar

p_{sep} - tlak separatora, bar;

$$\Delta p_t = p_{wf} - p_{wh} \tag{2-5}$$

gdje su:

Δp_t - gubitak tlaka u proizvodnom nizu (tubingu), bar

p_{wf} - dinamički tlak na dnu bušotine, bar

p_{wh} - dinamički tlak na ušću bušotine, bar.

Gradijent pada tlaka za vertikalnu plinsku bušotinu dan je jednadžbom 2-6 (Čikeš, 2015):

$$p_{wf}{}^2 - p_{wh}{}^2 e^s = f_m \frac{8q^2}{\pi^2 d_t{}^5} \frac{p_{sc}{}^2}{T_{sc}{}^2} \frac{\bar{T}^2 \bar{Z}^2}{g} (e^s - 1) \quad (2\text{-}6)$$

gdje su:

p_{wf} - dinamički tlak na dnu bušotine, bar

p_{wh} - dinamički tlak na ušću bušotine, bar

e - Eulerov broj/baza prirodnog logaritma (2,71828)

f_m - višefazni faktor trenja, -

q - trenutna proizvodnja bušotine, m^3/dan

d_t - unutarnji promjer proizvodnog niza (tubinga), m

p_{sc} - standardni tlak (101 325 Pa)

T_{sc} - standardna temperatura (15 °C = 288 K)

$\bar{T}$ - srednja temperatura, K

$\bar{Z}$ - srednji faktor stlačivosti plina, -

g - akceleracija sile teže (9,80665 m/s^2),

pri čemu je:

$$s = \frac{2\gamma_g M_a g H_b}{\bar{Z} R \bar{T}} \quad (2\text{-}7)$$

gdje su:

s - eksponent koji se odnosi na hidrostatsku komponentu gradijenta pada tlaka, m^{-1}

γ_g - relativna gustoća plina, -

M_a - molarna masa zraka (28,966 g/mol)

H_b - dubina bušotine, m

R - opća plinska konstanta (8,314 $J/mol^{-1} K^{-1}$).

Jednadžba 2-6 je primjenjiva prvenstveno za bušotine koje proizvode suhi plin, no korekcijom relativne gustoće plina, tj. smjese, može se koristiti i kod proizvodnje plina uz male količine kapljevine. Ako je odnos plina i kapljevine (GLR; *engl. Gas-Liquid Ratio*), tj. proizvodni plinski faktor manji od 1800 m^3/m^3 ili ako je brzina protjecanja smjese premala da bi se spriječilo nakupljanje kapljevine u bušotini, potrebno je primijeniti korelacije za

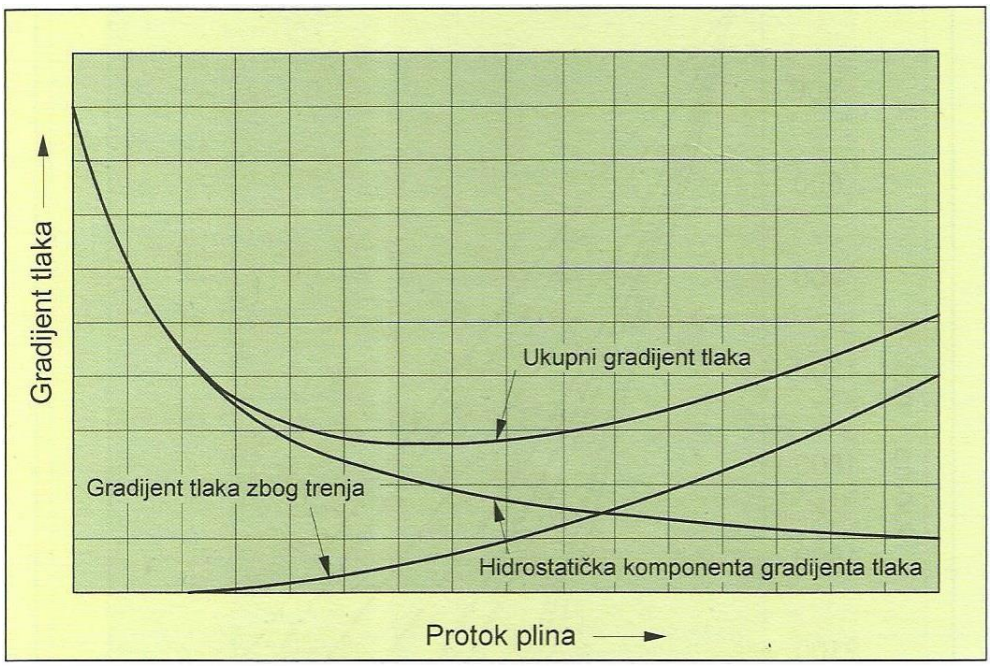
višefazni protok ili metodu razvijenu za plinske i plinsko-kondenzatne bušotine – tzv. Grayevu metodu (Gray, 1974).

Utjecaj varijabli višefaznog protoka fluida u proizvodnom nizu na gradijent tlaka je sljedeći (Čikeš, 2015):

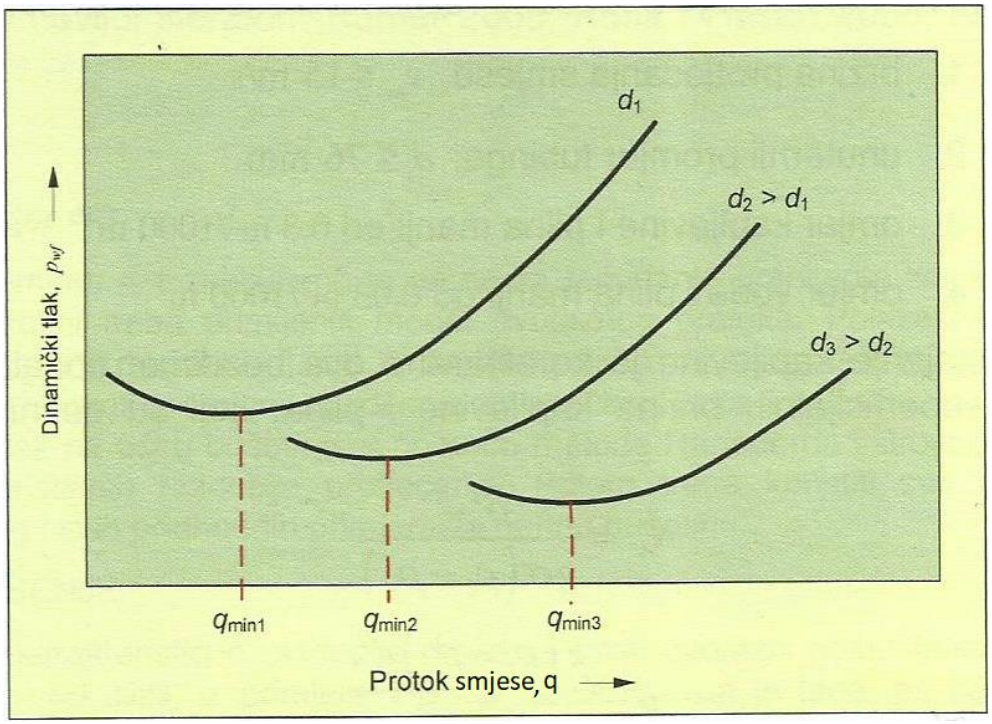
- Protok plina – povećanjem protoka plina, uslijed veće brzine, dolazi do povećanja komponente trenja i do smanjenja koeficijenta zaostajanja kapljevine, a time i hidrostatičke komponente. Dakle, povećanjem protoka plina, dinamički tlak na dnu bušotine smanjuje se do određene točke, a daljnji porast protoka plina rezultira povećanjem dinamičkog tlaka, odnosno komponenta trenja počinje rasti brže nego li se hidrostatička komponenta smanjuje (slika 2-5.);
- Omjer kondenzata i plina (CGR; *engl. Condensate-Gas Ratio*) – povećanjem omjera kondenzata i plina dolazi do povećanja gustoće smjese i koeficijenta zaostajanja kapljevine, a time i hidrostatičke komponente;
- Omjer vode i plina (WGR; *engl. Water-Gas Ratio*) – povećanjem omjera slojne vode i plina dolazi do istih promjena kao i kod povećanja omjera kondenzata i plina, no većeg intenziteta zbog veće gustoće vode;
- Viskoznost smjese – povećanjem viskoznosti dolazi do većeg gubitka tlaka zbog trenja;
- Unutarnji promjer proizvodnog niza – povećanjem unutarnjeg promjera proizvodnog niza dolazi do smanjenja gradijenta tlaka zbog smanjenja komponente trenja, no do određene točke nakon koje dolazi do povećanja gradijenta tlaka. Naime, kako unutarnji promjer raste, brzina fluida se smanjuje i može postati premala za učinkovito iznošenje kapljevine na površinu što rezultira povećanjem zaostajanja kapljevine, odnosno hidrostatičke komponente te na kraju može rezultirati i gušenjem bušotine. Za određeni promjer proizvodnog niza, dubinu bušotine, dinamički tlak na ušću i omjer kondenzata/vode i plina postoji minimalni protok smjese koji će onemogućiti nakupljanje kapljevine u bušotini (slika 2-6.).

Dosad su razvijene mnoge korelacije (metode) za predviđanje gradijenta tlaka kod višefaznog protjecanja fluida u bušotinama poput metoda Poettmanna i Carpentera (1952), Hagedorna i Browna (1965) te Dunsa i Rosa (1963), no nije razvijena niti jedna metoda koja

bi se mogla smatrati najtočnijom, već je svaka zadovoljavajuća pod uvjetom da se koristi pod odgovarajućim uvjetima protjecanja (Koščak-Kolin, 2015).



Slika 2-5. Ukupni gradijent tlaka i pojedine komponente u ovisnosti o protoku plina (Čikeš, 2015)

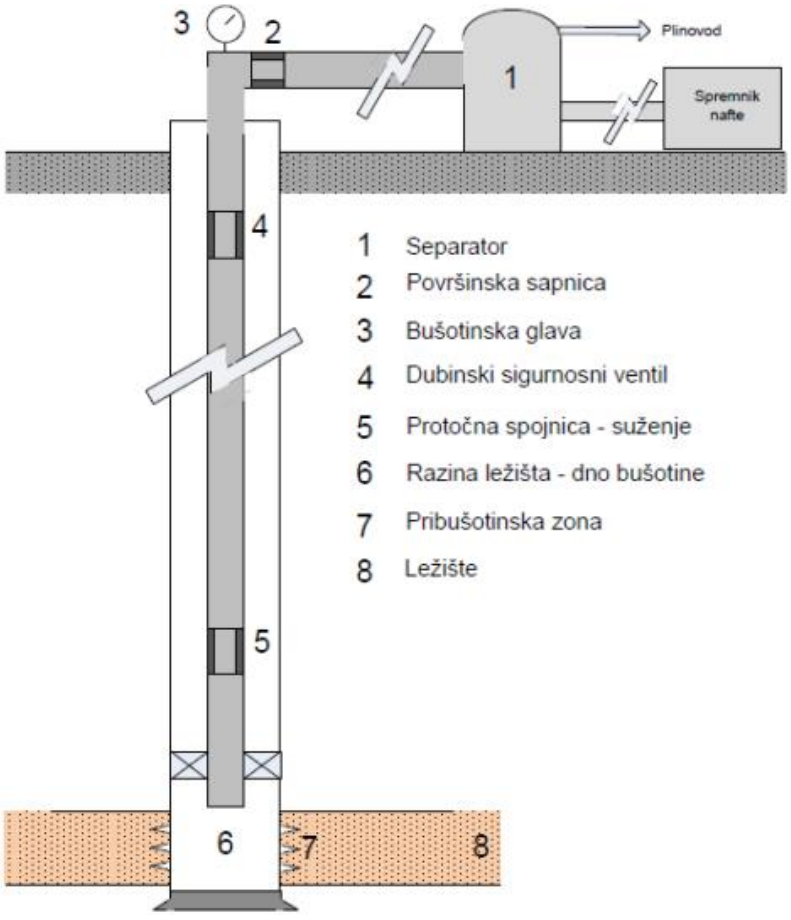


Slika 2-6. Utjecaj unutarnjeg promjera proizvodnog niza na minimalni potrebni protok smjese (Čikeš, 2015)

2.2. TEORIJA I PRIMJENA NODAL (ČVORIŠNE) ANALIZE

Dizajn proizvodnog sustava ne može se podijeliti na dva neovisna dijela: ležište i sustav cijevi zbog toga što količina fluida koja utječe iz ležišta u bušotinu ovisi o padu tlaka u sustavu cijevi dok, istovremeno, taj pad tlaka u sustavu cijevi (proizvodnoj opremi) ovisi o količini fluida koja protječe kroz nju. Dakle, cjelokupni proizvodni sustav mora se analizirati kao cjelinu (Hossain, 2008).

NODAL ili čvorišna analiza provodi se na način da se odabere čvorište (*engl. node*) u proizvodnom sustavu (slika 2-7.), najčešće dno bušotine (dubina sredine perforacija) gdje vlada dinamički tlak na dnu bušotine (p_{wf}), te se sustav u toj točki podijeli na dvije sekcije: sekciju utoka i sekciju istoka.



Slika 2-7. Moguće čvorišne točke proizvodnog sustava (Brkić, 2017a)

Sekciju utoka fluida u čvorište (*engl. inflow*) čine komponente sustava uzvodno od čvorišta (od dna bušotine do ležišta) te se grafički prikazuje u obliku krivulje utoka koja je istovjetna indikatorskoj (IPR) krivulji, dok sekciju istoka fluida iz čvorišta (*engl. outflow*) čine komponente sustava nizvodno od čvorišta (od dna bušotine do separatora ili ušća bušotine), a prikazuje se u obliku krivulje istoka, odnosno krivulje dinamičkih tlakova koja se još naziva i krivuljom vertikalnog podizanja (VLP; *engl. Vertical Lift Performance* ili TPR; *engl. Tubing Performance Relationship*) (Čikeš, 2015).

Izgled krivulje vertikalnog podizanja (VLP) ovisi o (Brkić i Tišljar, 2018):

- unutarnjem promjeru i duljini proizvodnog niza (tubinga),
- sastavu, gustoći, viskoznosti i brzini protjecanja fluida (protoku),
- faktoru trenja,
- dinamičkom tlaku na ušću bušotine,
- omjeru vode i plina (WGR), odnosno kondenzata i plina (CGR).

Promjenom ovih parametara mijenja se VLP krivulja pa se prema tome dimenzionira i optimizira proizvodni sustav bušotine.

Za određivanje protoka kroz sustav moraju biti zadovoljena dva teoretska uvjeta (Čikeš, 2015):

1) utok u čvorište jednak je istoku iz čvorišta i
2) samo jedan tlak postoji u čvorištu pri određenom protoku.

Dva su tlaka određena te nisu funkcija protoka. To su ležišni tlak (ulazni tlak sustava) i tlak separatora ili ušća bušotine (izlazni tlak sustava). Ako se proizvodnja bušotine kontrolira površinskom sapnicom, kao fiksni izlazni tlak uzima se dinamički tlak na ušću bušotine. Ako se za čvorište odabere dno bušotine i dinamički tlak na ušću kao izlazni, tlak u čvorištu računa se u oba smjera (uzvodno i nizvodno) pomoću fiksnih tlakova (ležišni i tlak ušća) prema sljedećim jednadžbama (Brkić, 2017a):

- utok u čvorište: $$p_{wf} = \overline{p_R} - \Delta p_R - \Delta p_S \quad (2\text{-}8)$$
- istok iz čvorišta: $$p_{wf} = p_{wh} + \Delta p_t \quad (2\text{-}9)$$

gdje su:

p_{wf} - dinamički tlak na dnu bušotine, bar

$\overline{p_R}$ - srednji ležišni tlak, bar

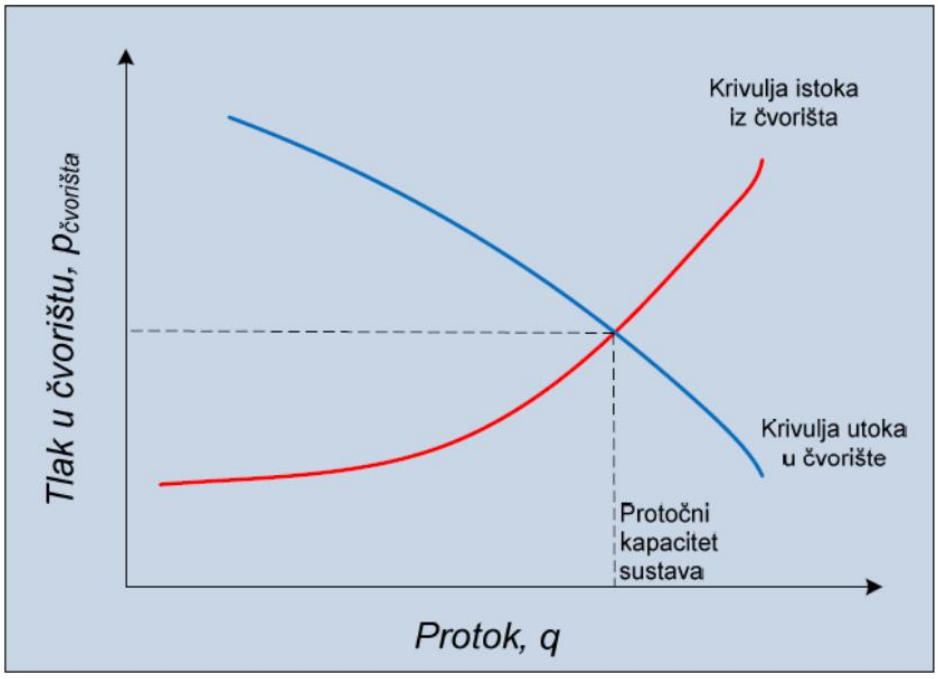
Δp_R - pad tlaka pri protjecanju kroz ležište, bar.

Δp_s - pad tlaka u pribušotinskoj zoni zbog *skin* efekta, bar

p_{wh} - dinamički tlak na ušću bušotine, bar

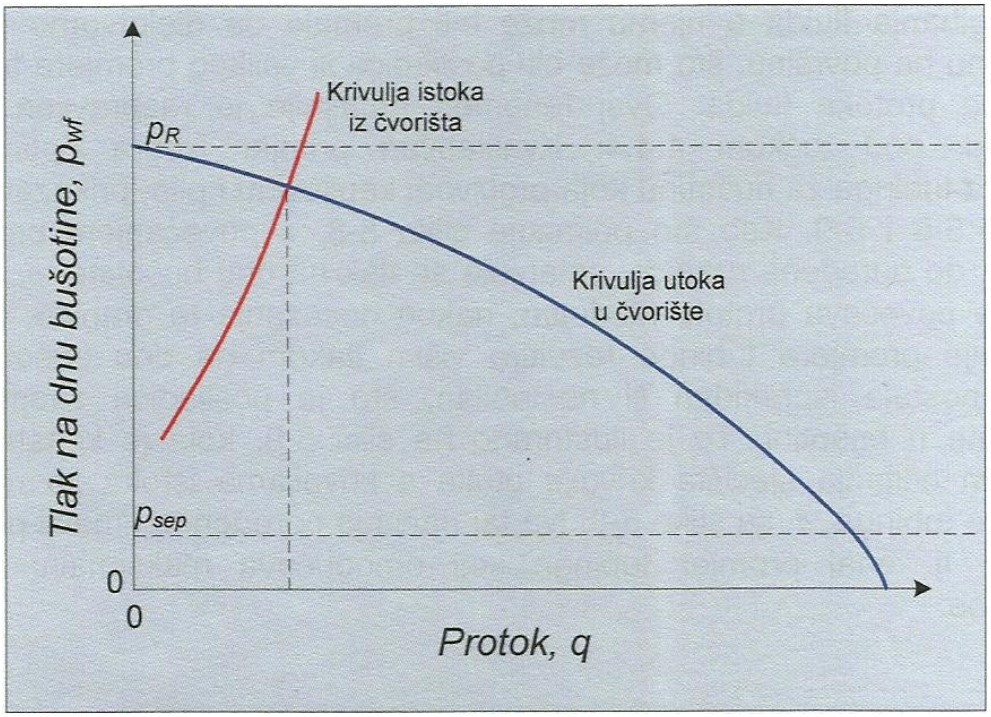
Δp_t - gubitak tlaka u proizvodnom nizu (tubingu), bar

S obzirom na to da pad tlaka u bilo kojoj komponenti sustava ovisi o protoku, dijagram tlaka čvorišta u funkciji protoka daje dvije krivulje: IPR i VLP krivulju, čije sjecište označava radnu točku, odnosno protočni kapacitet sustava što je prikazano na slici 2-8. Promjena bilo koje komponente analizira se ponovnim proračunom tlaka čvorišta u funkciji protoka koristeći nova svojstva komponente koja se promijenila te se, pri tome, sjecište krivulje pomiče dajući novu radnu točku sustava (protočni kapacitet i tlak čvorišta). Do promjena radne točke također dolazi i kod promjena fiksnih tlakova, primjerice, smanjenja ležišnog tlaka uslijed crpljenja ležišta i/ili promjena separatorskih uvjeta odnosno uvjeta na površinskoj sapnici (ušću bušotine). Ukupni pad tlaka u sustavu može biti fiksan određeno vrijeme, no proizvodni kapacitet ovisi o tome gdje se zbivaju pojedini gubici tlaka, odnosno ako je prevelik pad tlaka u jednoj komponenti, neće preostati dovoljno tlaka za djelotvorne performanse drugih komponenti (Čikeš, 2015).

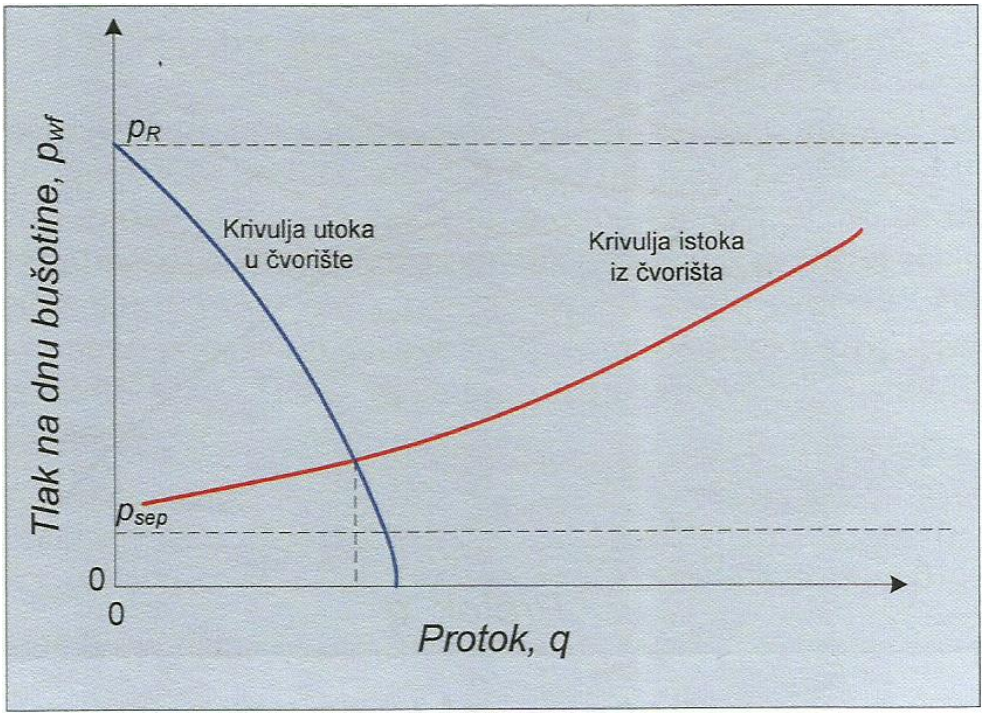


Slika 2-8. Određivanje protočnog kapaciteta (radne točke) proizvodnog sustava (Čikeš, 2015)

Na slici 2-9. dan je primjer sustava s ležištem koje je sposobno proizvoditi velike količine fluida, no proizvodni niz je premalog promjera, pa je izdašnost bušotine, zbog prevelikog pada tlaka u proizvodnom nizu, slaba. Na slici 2-10. je prikazan sustav s prevelikim padom tlaka uslijed smanjene propusnosti u pribušotinskoj zoni ili neodgovarajućeg perforiranja, odnosno *skin* efekta, te je u tom slučaju nužno poboljšati performanse utoka.



Slika 2-9. Proizvodni kapacitet sustava ograničen karakteristikama istoka (Čikeš, 2015)



Slika 2-10. Proizvodni kapacitet sustava ograničen karakteristikama utoka (Čikeš, 2015)

Da bi se NODAL analizu moglo primijeniti na određenu bušotinu, potrebno je proračunati / poznavati pad tlaka u svim komponentama sustava, jer ukupan pad tlaka ne ovisi samo o protoku, već i o dimenzijama te drugim karakteristikama komponenti (Čikeš, 2015).

Zaključno, NODAL analiza se primjenjuje za (Brkić, 2017a):

- izbor i dimenzioniranje proizvodnog niza cijevi,
- izbor i dimenzioniranje površinskog cjevovoda,
- dizajn pješčanog zasipa,
- dimenzioniranje površinske sapnice,
- dimenzioniranje dubinskog sigurnosnog ventila,
- analizu postojećeg sustava u svrhu optimalizacije, odnosno otkrivanja abnormalnih ograničenja protoka,
- dizajn metoda umjetnog podizanja fluida,
- vrjednovanje stimulacijskih radova u bušotinama,
- analizu utjecaja načina perforiranja (gustoće, tj. broja perforacija),
- predviđanje utjecanja crpljenja ležišta na proizvodni kapacitet bušotine.

3. OSNOVNI PODACI O PLINSKO-KONDENZATNOM POLJU I BUŠOTINI X-1

U ovome poglavlju dani su osnovni podaci o polju „X“ i pregled povijesti istraživanja polja „X“ te su opisane geološke karakteristike ležišta, kao i tehničke karakteristike i konstrukcija bušotine X-1.

3.1. OPIS I POVIJEST ISTRAŽIVANJA PLINSKO-KONDENZATNOG POLJA

Plinsko-kondenzatno polje „X“ nalazi se u sjeverozapadnom dijelu Dravske depresije i jedno je od 4 plinsko-kondenzatnih polja tzv. „Duboke Podravine“ karakteriziranih velikim dubinama zalijeganja ležišta, izrazito visokim početnim ležišnim tlakovima (do 500 bar) i temperaturama (do 235 °C) te prisutnošću agresivnih neugljikovodičnih primjesa, tj. korozivnih (kiselih) plinova sumporovodika (H_2S) i ugljičnog dioksida (CO_2), žive (Hg) i merkaptana (RSH) u prirodnom plinu te klorida (Cl^-) otopljenih u slojnoj vodi uz početni veliki proizvodni kapacitet i velike brzine protjecanja što čini uvjete proizvodnje teškima (djelovanje korozije i erozije na bušotinsku opremu) (Hrnčević et al., 2008; Tišljar i Zelić, 2016). U tablici 3-1. prikazane su početne vrijednosti ležišnih parametara polja „X“.

Tablica 3-1. Početne vrijednosti ležišnih parametara polja „X“ (Mlinarić i Zelić, 1994)

Parametar	Polje "X"
Ležišni tlak, bar	477
Ležišna temperatura, °C	182
Dubina zalijeganja ležišta, m	3415 - 3434
Propusnost ležišta, 10^{-3} μm^2 (mD)	0,2 - 29
Poroznost ležišta, %	5%
Tip ležišne stijene	filit, kvarcit, dolomit, vapnenac

Nakon prvih rezultata geofizičkih istražnih radova 1978. godine, interpretacijom je utvrđena antiklinala te je iste godine istražnom bušotinom otkriveno polje. Razrada polja započinje 1983. godine, a tijekom kasnijih godina provodi se reinterpretacija strukture ležišta

te nova seizmička mjerenja tijekom kojih je snimljeno 450 km seizmičkih profila. Kasnih 1990.-tih i početkom 2000.-tih provedena su i interpretirana 3D seizmička mjerenja. Kasnije, tijekom faze razrade i proizvodnje došlo se do novih podataka o polju praćenjem novih koso usmjerenih bušotina i njihove proizvodnje te nove analize karotažnih dijagrama te se na temelju toga provela nova reinterpretacija strukture ležišta sa svrhom što detaljnijeg geološkog opisa ležišta (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2009).

Na polju je izbušeno ukupno 20 bušotina sa 25 kanala (vertikalnih i koso usmjerenih kanala bušotina). Proizvodnja s polja počela je 1985. godine, a trenutno se proizvodi iz 12 proizvodnih bušotina. Polje je drugo po veličini i proizvodnim količinama među plinskim poljima u Republici Hrvatskoj te prvo po proizvodnim količinama kondenzata (Hrvatski geološki institut, 2014). Tablica 3-2. prikazuje pridobive rentabilne rezerve te preostale godine rentabilne proizvodnje polja „X“. Ukupna dnevna proizvodnja polja „X“, prema podacima iz 2017. godine, iznosi: 524 000 m^3 prirodnog plina, 163 m^3 kondenzata i 404 m^3 slojne vode (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017). U tablici 3-3. prikazan je sastav ležišnog fluida plinsko-kondenzatnog polja „X“.

Tablica 3-2. Pridobive rentabilne rezerve plina i kondenzata te preostale godine rentabilne proizvodnje polja „X“ (Hrvatski geološki institut, 2014)

Eksploatacijsko polje	Datum stanja rezervi važećeg elaborata	Pridobive rentabilne rezerve		Preostale godine rentabilne eksploatacije od datuma stanja važećeg elaborata	Godina završetka proizvodnje	Godina početka proizvodnje
		Plin u 10^3 m^3	Kondenzat u tonama			
X	31.12.2013.	**2 353 370**	**522 696**	**32**	**2045.**	**1985.**

Tablica 3-3. Sastav ležišnog fluida plinsko-kondenzatnog polja „X“ (Simon, 2017)

Polje "X"	
Komponenta	**Molni udio komponente u smjesi**
metan (C_1)	69,97%
etan (C_2)	6,76%
propan (C_3)	2,35%
i-butan (i-C_4)	0,63%
n-butan (n-C_4)	0,75%
i-pentan (i-C_5)	0,39%
n-pentan (n-C_5)	0,34%
heksan i viši ugljikovodici (C_{6+})	5,26%
dušik (N_2)	1,37%
ugljikov dioksid (CO_2)	12,17%
	mg/m^3
sumporovodik (H_2S)	137
živa (Hg)	1,5
merkaptan (RSH)	9

3.2. GEOLOŠKI OPIS I KARAKTERISTIKE LEŽIŠTA „X“

Ležište, odnosno struktura „X“ asimetrična je antiklinala. Akumulacija ugljikovodika nalazi se unutar četiri kronostratigrafske cjeline međusobno odvojene transgresivnim granicama, a to su (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2009; Hrnčević et al., 2010):

- donji paleozoik,
- permo-trijas,
- srednji i gornji trijas, te
- donji i srednji marinski miocen.

Početni tlak ležišta je oko 40% veći od hidrostatskog tlaka, što klasificira ležište kao natpritisnuto, odnosno ležište s nadtlakom, kao i akvifer ispod. Salinitet akvifera kreće se u rasponu 12-14 gNaCl/l, izuzev sjeverozapadnog dijela gdje je salinitet viši (27-27,5 gNaCl/l). Prisutnost sumporovodika (H_2S), merkaptanskog sumporovodika i žive, uz visok

salinitet slojne vode na većim dubinama, ukazuje na aktivnost hidrotermalnih otopina. Na temelju analize karotažnih mjerenja (dijagrama) i hidrodinamičkih ispitivanja u bušotinama, određen je kontakt plin/voda na dubini od 3470 m u istočnom dijelu ležišta, a u zapadnom dijelu na dubini od 3370 m (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2009).

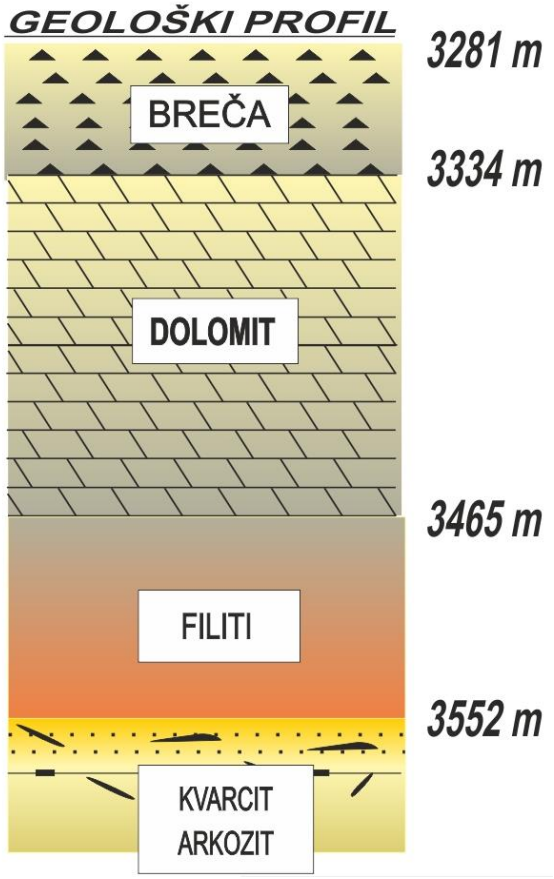
Svi litofacijesi ležišnih stijena su raskriveni, odnosno otvoreni za proizvodnju, a to su: paleozojski granito-gnajsevi, karbonatni i amfibolitski škriljavci, karbonatni konglomeratni filiti i kvarciti, permotrijaski metapješčenjaci (metaareniti) i doloanhidriti, mezozojski karbonati – dolomikriti te miocenski karbonatni pjeskoviti vapnenci tipa *wackestone* i *grainstone*. Upravo zbog litološke raznolikosti ležišnih stijena u vertikalnom i lateralnom smjeru petrofizikalna svojstva jako variraju: od vrlo visokih do vrlo niskih vrijednosti poroznosti i propusnosti. U ležištu „X" postoje tri tipa poroznosti ovisno o mehaničkim karakteristikama stijena, koje pripadaju skupini prirodno raspucanih kolektorskih stijena (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2009):

- makropukotinska (sekundarna) poroznost (granito-gnajsevi),
- mikropukotinska (sekundarna) poroznost (metapješčenjaci, kvarciti i dolomiti) i
- dvostruka poroznost, tj. primarna (međuzrnska) i pukotinska poroznost (vapnenci tipa *grainstone* i mikro breče).

Sekundarna (pukotinska) poroznost je nositelj akumulacije plina i kondenzata, dok je primarna poroznost (šupljine matriksa), u tome smislu, zanemariva (Hrnčević et al., 2010).

3.3. GEOLOŠKI PODACI BUŠOTINE X-1

Bušotina X-1 vertikalna je bušotina smještena u središnjem dijelu polja te su njome raskrivena sva 4 litofacijesa na polju. Najpliće su raskrivene polimiktne breče, zatim slijede dolomitne breče, pa filiti i kvarciti te je najdublje raskriven gnajs kako je i prikazano litostratigrafskim stupom (geološkim profilom) ležišta „X“ na slici 3-1. Bušotina pripada hidrodinamskoj jedinici s početnim kontaktom plin/voda na dubini od 3470 m (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2015).



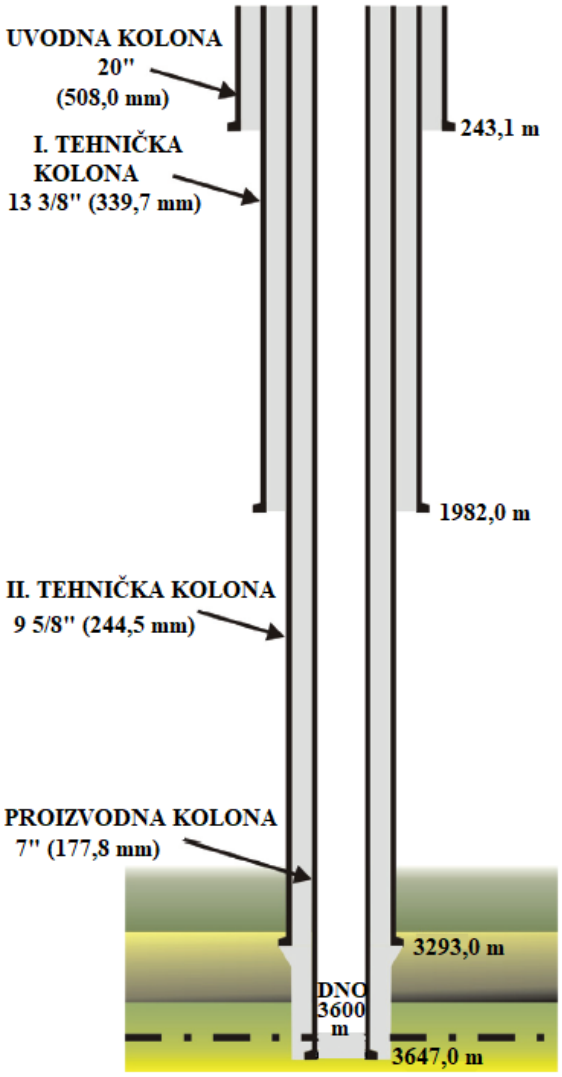
Slika 3-1. Geološki profil (litostratigrafski stup) ležišta „X“ (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2015).

3.4. TEHNIČKI PODACI I KONSTRUKCIJA BUŠOTINE X-1

Bušotina X-1 je izbušena i opremljena 1989. godine. Konstrukcija bušotine (tipična konstrukcija bušotina „Duboke Podravine“ prikazana na slici 3-2.), je sljedeća (Tehnička dokumentacija Crosco, d.o.o., 2015):

- nadmorska visina ušća bušotine: 110 m,
- dubina bušotine: 3650 m,
- dno u bušotini (vrh cementa u proizvodnoj koloni): 3600 m,
- ugrađene kolone zaštitnih cijevi:
  - uvodna kolona: Φ508,0 mm (20”), 94# (139,9 kg/m), J-55, *Buttres*, ugrađena do dubine od 243,1 m, zacementirana do ušća;
  - I. tehnička kolona: Φ339,7 mm (13 3/8”), 68# (101,2 kg/m), N-80, *Buttres*, ugrađena do dubine od 1982,0 m, zacementirana do ušća;
  - II. tehnička kolona: Φ244,5 mm (9 5/8”), 47# (69,9 kg/m), L-80, *Buttres*, ugrađena do dubine od 3293,0 m, zacementirana do ušća;
  - proizvodna kolona: Φ177,8 mm (7”), 35# (52,09 kg/m), L-80, *VAM*, ugrađena do dubine od 3647,0 m, zacementirana do ušća.

Zaštita bušotinske opreme od korozije izvedena je primjenom posebnih vrsta materijala otpornih na sve vrste korozije pošto upotreba inhibitora korozije nije bila pouzdana jer se svaki inhibitor raspadao na temperaturi višoj od 150 °C. Tako je donji dio proizvodne kolone zaštitnih cijevi izrađen od specijalnog visokolegiranog nehrđajućeg čelika (austenitno-feritna legura s 13-25% kroma) s obzirom da prolazi kroz ležište i u stalnom je kontaktu s ležišnim fluidom (Tišljar i Zelić, 2016).

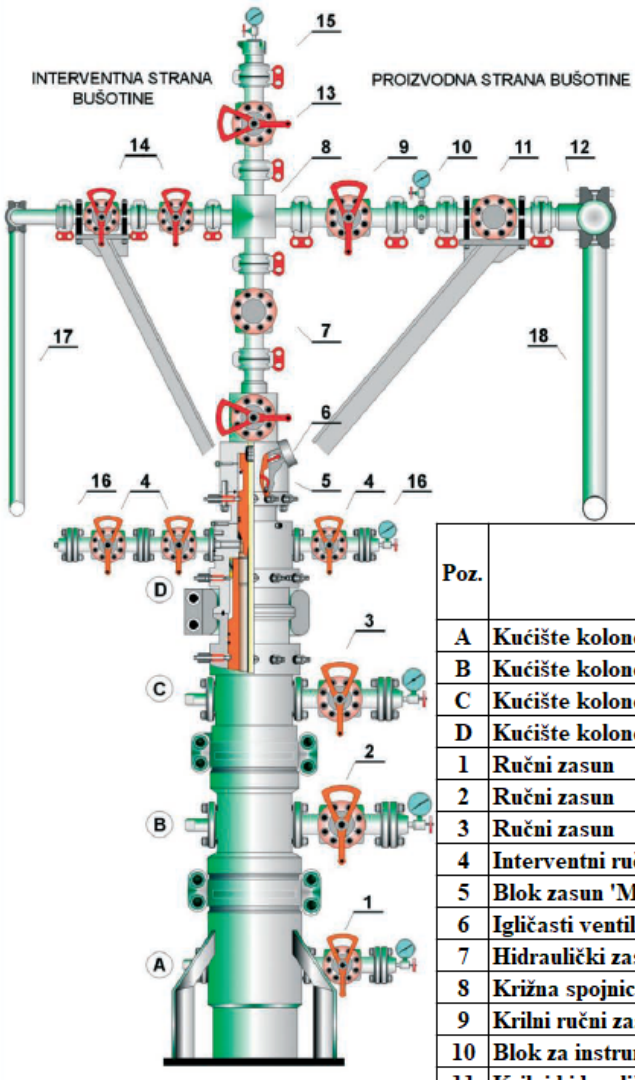


Slika 3-2. Konstrukcija bušotine X-1 (Hrnčević et al., 2010).

Nadzemna oprema bušotine X-1 (oprema ušća bušotine), prikazana na slici 3-3. i 3-4., također je tipska za bušotine „Duboke Podravine“. Bušotinska glava, nazivnog radnog tlaka 689,5 bar (10 000 psi), i erupcijski uređaj izrađeni su od materijala za korozivne uvjete (tzv. „cladirani“ materijali) dok su spojevi, umjesto prirubničkih, obujmički *Grayloc* (*engl. clamp*), a brtvljenje spojeva je tipa „metal na metal“. Jedino je priključni plinovod od podesive sapnice do plinske stanice izrađen od običnog ugljičnog čelika uz primjenu inhibitora korozije. Erupcijski uređaj sadrži ručne i hidrauličke visokotlačne zasune čija je unutrašnjost obložena materijalima otpornim na koroziju (*engl. cladding*). Ti dijelovi izrađeni su od dvoslojnog materijala: kao temeljni materijal koristi se martenzitni ugljični čelik, a kao završni premaz (obloga) legura *Inconel* (bez udjela željeza). Podesiva sapnica

za regulaciju protoka na ušću bušotine predstavlja i prvu redukciju dinamičkog tlaka na ušću bušotine (p_{wh}) na tlak priključnog plinovoda (Tišljar i Zelić, 2016).

Bušotina je također opremljena sigurnosno-blokadnom jedinicom koja omogućuje automatski rad bušotine, lokalno i daljinsko upravljanje dubinskim sigurnosnim ventilom (DSV), glavnim i krilnim hidrauličkim zasunom te sustavom interventnog gušenja što je prikazano na slici 3-5.

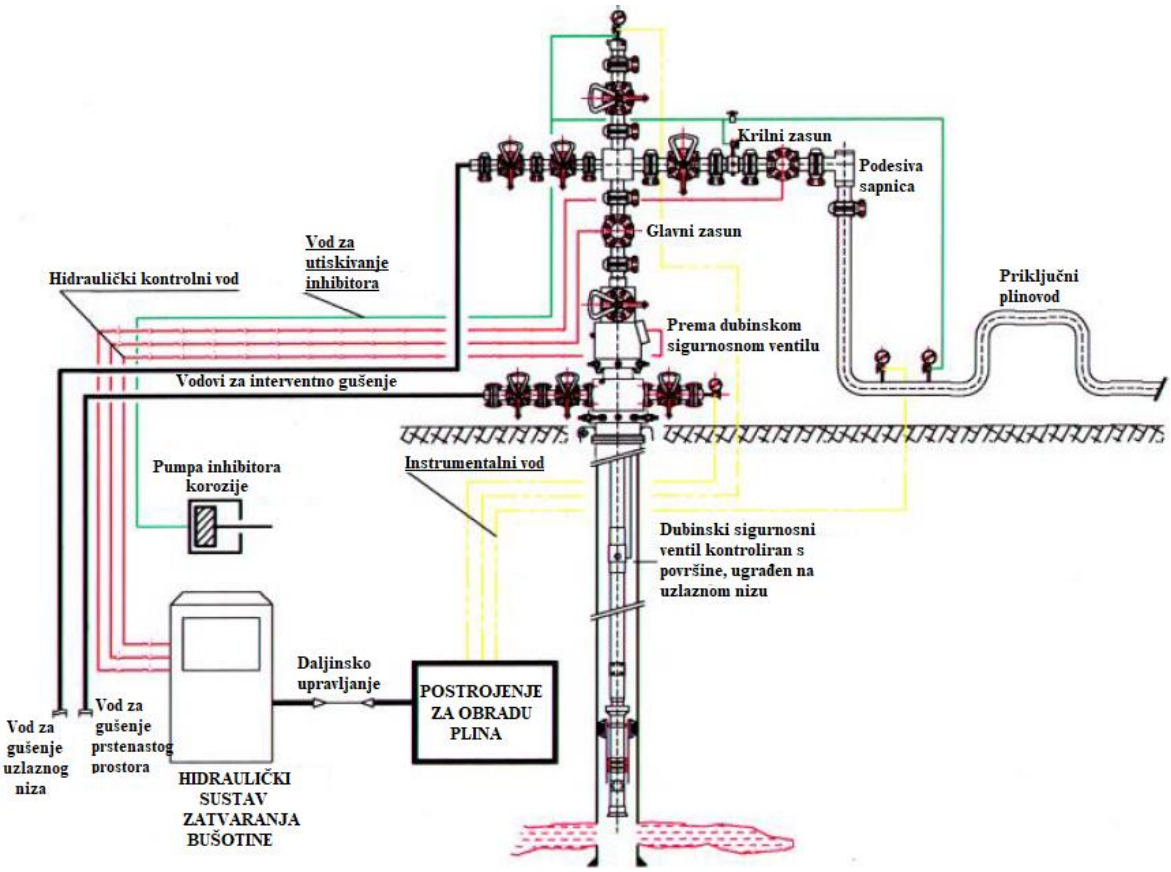


Poz.	NAZIV	Radni tlak (bar)
A	Kućište kolone 508 mm	210
B	Kućište kolone 339,7 mm	350
C	Kućište kolone 244,5 mm	350
D	Kućište kolone 177,8 mm	690
1	Ručni zasun	210
2	Ručni zasun	350
3	Ručni zasun	350
4	Interventni ručni zasun	690
5	Blok zasun 'MASTER'	690
6	Igličasti ventil dubinskog sigurnosnog ventila	690
7	Hidraulički zasun	690
8	Križna spojnica	690
9	Krilni ručni zasun	690
10	Blok za instrumente	690
11	Krilni hidraulički zasun 'WNG'	690
12	Podesiva sapnica	690
13	Ručni zasun 'SWAB'	690
14	Interventni ručni zasun	690
15	Pokrovna kapa	690
16	Pokrovna prirubnica s priključkom za manometar	690
17	Vod za interventno gušenje	690
18	Priključni plinovod	420

Slika 3-3. Oprema ušća bušotine X-1 (Tišljar i Zelić, 2016).



Slika 3-4. Fotografija tipične nadzemne opreme bušotina „Duboke Podravine“ (Tišljar et al., 2015).



Slika 3-5. Sigurnosno-blokadna jedinica i sustav interventnog gušenja bušotine X-1 (Tišljar et al., 2015).

4. POVIJEST PROIZVODNJE BUŠOTINE X-1 I PROVEDENI RUDARSKI (REMONTNI) RADOVI

U ovome poglavlju prikazan je pregled povijesti proizvodnje bušotine X-1 od početka proizvodnje 1989. godine do danas uz sve provedene rudarske (remontne) radove i njihove rezultate.

4.1. PROIZVODNJA I STANJE BUŠOTINE X-1 OD POČETKA PROIZVODNJE DO KISELINSKE OBRADE 2009. GODINE

U bušotini je u lipnju 1989. godine izveden DST (*engl. Drill Stem Test*), odnosno ispitivanje sloja. DST je izveden na intervalu 3293,0 - 3334,0 m (najgornji sloj – breče) te je tijekom ispitivanja proizvedeno otprilike 170 000 m^3/dan plina na sapnicu promjera 9,52 mm i uz dinamički tlak na ušću od 140 bar, dok je depresija na sloj iznosila 180 bar. Interpretacijom DST-a utvrđen je pad tlaka uslijed oštećenja sloja (pribušotinske zone) od 140 bar. U rujnu i listopadu provedeno je hidrodinamičko mjerenje (HDM) tijekom kojeg je, kod zatvorene bušotine, izmjeren početni statički tlak ušća bušotine od 311 bar. Interpretacijom hidrodinamičkog mjerenja potvrđeno je veliko oštećenje pribušotinske zone (efekt *skina*) te veliki pad tlaka uslijed tog oštećenja. Provedeno je i mjerenje proizvodnih količina visokotlačnim separatorom (VTS) te su dobiveni sljedeći rezultati (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 1989):

- proizvodnja plina (q_g): 146 587 m^3/dan,
- proizvodnja kondenzata (q_c): 67,22 m^3/dan,
- proizvodnja slojne vode (q_w): 5,44 m^3/dan,
- dinamički tlak na ušću bušotine (p_{wh}): 204 bar,
- dinamička temperatura na ušću bušotine (t_{wh}): 45 °C,
- tlak separatora (p_{sep}): 59 bar,
- temperatura separatora (t_{sep}): 24 °C.

Proizvodnja bušotine X-1 započinje u listopadu 1989. godine iz 2 proizvodna intervala 3450,0 - 3443,0 m i 3440,0 - 3415,0 m koji se nalaze unutar dolomitnih breča. U

tablici 4-1. prikazane su prosječne početne vrijednosti ležišnih parametara za raskrivene intervale. Bušotina X-1 na početku je davala 143 000 m^3/dan plina, 95 m^3/dan kondenzata i zanemarivih 6,5 m^3/dan slojne vode uz dinamički tlak na ušću bušotine od 222 bara (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2009).

Tablica 4-1. Prosječne početne vrijednosti ležišnih parametara (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2009)

Ležište	Interval	Očekivani slojni fluid	Poroznost	Zasićenje vodom	Efektivna debljina
	m		%	%	m
X	3450,0 – 3443,0 m (7,0 m)	plin	5	44	3,7
	3440,0 – 3415,0 m (25,0 m)	plin	5	38	15

4.1.1. Početno proizvodno opremanje bušotine X-1

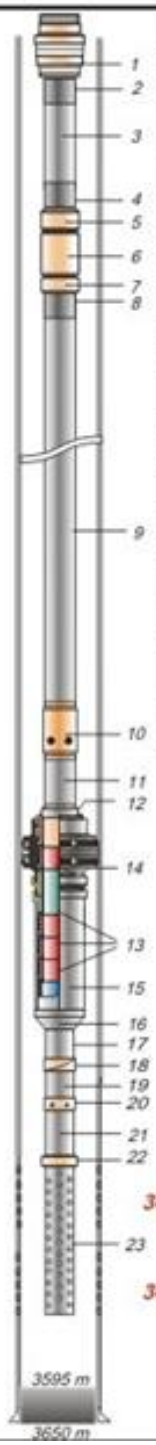
Početno proizvodno opremanje bušotine, prikazano na slici 4-1., temeljeno je na tadašnjim uvjetima proizvodnje, tj. velikim davanjima uslijed kojih su temperature ušća bušotine bile vrlo visoke, odnosno dolazilo je do zagrijavanja i produljenja uzlaznog niza u rasponu 3 - 6 metara. Proizvodni niz uzlaznih cijevi (tubinga) vanjskog promjera 73,02 mm ($2^7/_8$”), jedinične težine 9,5 kg/m’ (6,4#), kvalitete čelika L-80 i s *New Vam* navojnim spojem, ugrađen je do dubine od 3406,0 m, a izrađen je od visokolegiranog čelika s 13% kroma te je povećane vlačne čvrstoće s obzirom na to da visoka temperatura smanjuje vlačnu čvrstoću. Ostala dubinska oprema (permanentni paker, brtvenica, brtvena produžnica, prijelaz za odlaganje, klizna vrata i dubinski sigurnosni ventil) izrađena je od još kvalitetnijeg *Incoloy* materijala uz primjenu elastomera otpornih na visoke temperature i tlakove te kisele plinove. U početku su za brtvene elemente korišteni materijali *teflon*, koji se previše širio na visokim temperaturama, i *viton*, koji nije bio otporan na amine prisutne u kondenzatu i na fluide kod kemijskih obrada, a kasnije *aflas* i *kalrez* koji su zadovoljavali postojeće uvjete. Zbog temperaturnih efekata, tj. produljenja i skraćenja niza uzlaznih cijevi uslijed toplog i hladnog stanja bušotine, primijenjen je permanentni paker s brtvenicom za

kompenzaciju kretanja niza pomičnim brtvljenjem (pomična veza paker-tubing) unutar tijela pakera (polirane sržne cijevi) i brtvene produžnice (omogućen je hod brtvenice u pakeru i brtvenoj produžnici). U svrhu dodatne sigurnosti na nizu uzlaznih cijevi ugrađen je dubinski sigurnosni ventil (DSV) ugradiv na proizvodnom nizu sa zaklopcem za zatvaranje protoka uz protočne spojnice ispod i iznad, koji u slučaju propuštanja zatvara bušotinu i sprječava erupciju. Opcija dubinskog sigurnosnog ventila ugradivog na žici ne bi bila zadovoljavajuća jer bi protočna površina bila znatno smanjena (smanjeni promjer) te bi pri velikim proizvodnim količinama brzina protjecanja fluida uzrokovala turbulenciju i eroziju proizvodnog niza (Tišljar i Zelić, 2016).

NAZIV BUŠOTINE:

X - 1

REDNI BROJ	NAZIV PROIZVODNE OPREME		L m	H m	OD mm	ID mm
1	VJEŠALICA TUBINGA "IKS" 2 ⅞" New VAM 6,4#				177,80	62,0
2	KRATKI TUBING 2 ⅞" New VAM 6,4#		2,44		73,02	62,0
3	TUBING 2 ⅞" New VAM 6,4#	(2 kom.)	21,87		73,02	62,0
4	KRATKI TUBING 2 ⅞" New Vam 6,4#		2,12		73,02	62,0
5	PROTOČNA SPOJNICA 2 ⅞" New Vam 6,4#		2,72		101,6	62,0
6	DSV "FMX" 2 ⅞" New VAM 6,4# ID=2,313"		2,06	28,94	120,09	58,75
7	PROTOČNA SPOJNICA 2 ⅞" New Vam 6,4#		1,2		101,6	62,0
8	KRATKI TUBING 2 ⅞" New Vam 6,4#		2,19		73,02	62,0
9	NIZ TUBINGA 2 ⅞" New Vam 6,4#	(278 kom.)	3347		73,02	62,0
10	KLIZNA VRATA OTIS "XDH" 2 ⅞" New Vam 6,4# ID = 2,313"		1,31	3382,0	99,07	58,75
11	TUBING 2 ⅞" New Vam 6,4#	(1 kom.)	12,14		73,02	62,0
12	GRANIČNIK		0,34		107,85	60,0
13	BRTVENICA S BRTVENIM JEDINICAMA		5,32		101,6	77,0
14	PAKER "BAKER F-2"		0,71	3398,3	144,4	100,0
15	BRTVENA PRODUŽNICA		6,85		121,2	101,5
16	PRIJELAZ 3 ½" Vam x 2 ⅞" EU		0,15		100,2	57,0
17	KRATKI TUBING 2 ⅞" EU		0,16		73,02	59,0
18	SPOJNICA ZA OTPAJANJE PERFORATORA		0,61		96,52	
19	KRATKI TUBING 2 ⅞" EU		2,48		73,02	59,0
20	CIRKULACIONA SPOJNICA		0,22		96,52	
21	TUBING 2 ⅞" EU	(1 kom.)	9,09		60,32	
22	GLAVA ZA AKTIVIRANJE PERFORATORA		2,45		96,52	49,0
23	PERFORATORI 2 ⅞" EU		35,76		85,72	



ZACIJEVLJENJE BUŠOTINE:

UVODNA KOLONA 20" 94# J-55 Butt	0 - 234,1 m
I. TEHNIČKA KOLONA 13 3/8" 68# N-80 Butt	0 - 1982 m
II. TEHNIČKA KOLONA 9 5/8" 47# L-80 Butt	0 - 3293 m
PROIZVODNA KOLONA 7" 35# L-80 VAM	0 - 3647 m

3415.0 - 3440.0 m

3443.0 - 3450.0 m

L = duljina opreme, m
H = dubina ugradnje opreme, m
OD (*engl. Outside Diameter*) = vanjski promjer opreme, mm
ID (*engl. Inside Diameter*) = unutarnji promjer opreme, mm

Slika 4-1. Početno proizvodno opremanje bušotine X-1 od 1989. do 2016. godine (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2009)

4.1.2. Rad bušotine na srednjem tlaku i s velikom depresijom na sloj

U tablici 4-2. prikazani su mjereni statički i dinamički tlakovi prilikom godišnjih hidrodinamičkih mjerenja od 2004. do 2008. gdje se može vidjeti pad ležišnog, a time i tlaka na dnu i ušću bušotine, tijekom godina proizvodnje. Tijekom HDM-a 2008. godine izmjeren je dinamički gradijent tlaka, prikazan u tablici 4-3., prilikom čega je izmjerena i dinamička temperatura dna bušotine od 176 °C te je izvršeno mjerenje proizvodnih količina prikazano u tablici 4-4. Na slici 4-2. prikazan je dijagram rezultata mjerenja statičkog i dinamičkog tlaka, odnosno testa protoka i testa porasta tlaka. Iz mjerenog porasta tlaka izračunat je statički slojni (ležišni) tlak od 208 bara na dubini od 3382 m (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2008).

Tablica 4-2. Izmjereni statički i dinamički tlakovi tijekom HDM-a od 2004. do 2008. godine (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2015)

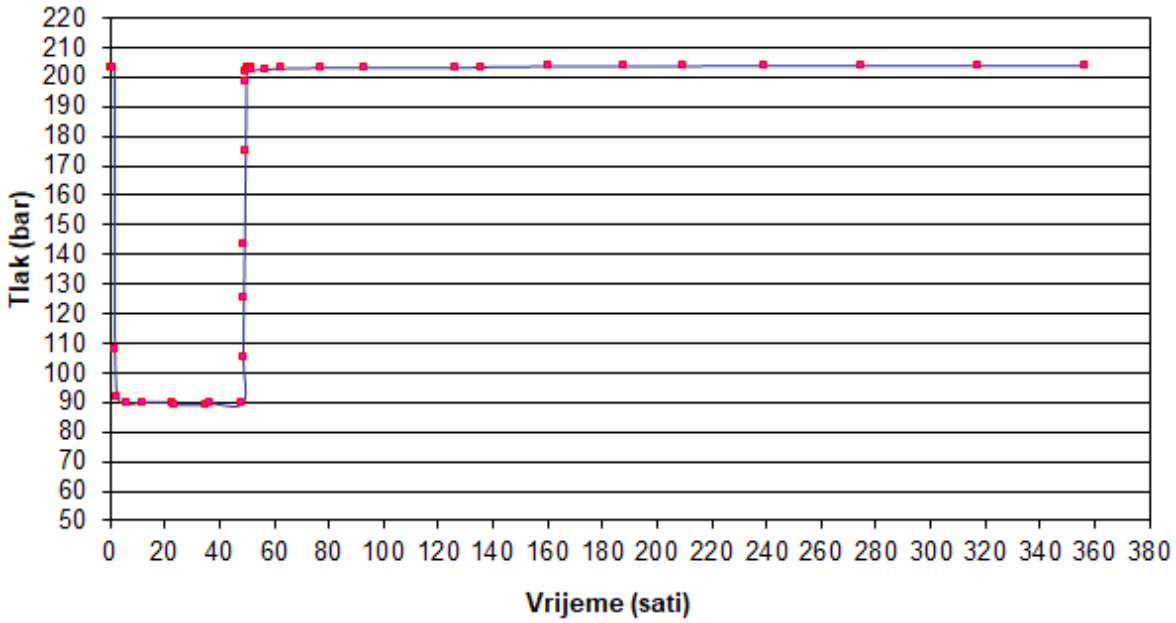
	Bušotina X-1	2008.	2007.	2006.	2005.	2004.
Dinamički uvjeti	Datum mjerenja	8-ruj-08	14-ruj-07	1-lip-06	10-lip-05	22-svi-04
	$p_{ušće}$	57,9 bar	66,8 bar	72,8 bar	75,1 bar	93,8 bar
	p_{dno}	89,1 bar	98,7 bar	112,5 bar	116,5 bar	140,5 bar
	Dubina mjerenja	3386 m	3386 m	3386 m	3386 m	3386 m
Statički uvjeti	Datum mjerenja	23-ruj-08	23-ruj-07	10-lip-06	21-lip-05	29-svi-04
	$p_{ušće}$	150,91 bar	150,7 bar	158,0 bar	166,7 bar	173,0 bar
	p_{dno}	204,1 bar	211,0 bar	220,2 bar	229,3 bar	238,3 bar
	Dubina mjerenja	3392 m	3386 m	3386 m	3386 m	3386 m
	Nasjed	3392 m	3392 m	-	-	-
	Dno bušotine	3595 m	3595 m	3595 m	3595 m	3595 m
	Otvoreni intervali	3415 - 3450 m	3415 - 3450 m	3415 - 3450 m	3415 - 3450 m	3415 - 3450 m

Tablica 4-3. Dinamički gradijent tlaka bušotine X-1 izmjeren tijekom HDM-a 2008. godine (Tehnička dokumentacija Crosco, d.o.o., 2008)

Dubina	**Tlak**	**dP/dH**	**Temperatura**
m	**bar**	**bar/m**	**^{o}C**
5	**57,97**		
1000	**68,95**	**0,11**	
2000	**77,50**	**0,09**	
2500	**81,78**	**0,09**	
3000	**85,81**	**0,08**	
3200	**87,57**	**0,09**	
3300	**88,58**	**0,10**	
3386	**89,08**	**0,06**	**176,00**

Tablica 4-4. Mjerenje proizvodnih količina bušotine X-1 2008. godine (Tehnička dokumentacija Crosco, d.o.o., 2008)

X-1	
DATUM	28.8.2008.
p_{wh}(bar)	60
t_{wh} (°C)	57
p_{sep} (bar)	57,6
t_{sep} (°C)	25
q_g (m^3/dan)	42 100
q_c (m^3/dan)	22,2
q_w (m^3/dan)	2,1



Slika 4-2. Dijagram rezultata testa protoka i testa porasta tlaka tijekom HDM-a 2008. godine (Tehnička dokumentacija Crosco, d.o.o., 2008)

Od 2008. godine postojala je inicijativa o potrebi optimizacije proizvodnje bušotine, odnosno rudarskih radova na bušotini X-1 s ciljem poboljšanja njene proizvodnosti. Prijedlog rudarskih radova 2008. godine uključivao je stimulacijske radove kiselinskog pranja perforacija (KPP) i hidrauličkog frakturiranja (HF) s podupiračem (propantom). Zbog problema u radu bušotine u zimskom razdoblju kada bušotina ne može raditi (stvaranje hidrata uslijed niske temperature) te upitnih rezultata eventualnih stimulacijskih radova, odlučeno je spuštanje bušotine na niži tlak sustava (rad na srednjem tlaku), odnosno niži tlak separatora (30 bar) što je rezultiralo povećanjem proizvodnje i depresije na dnu bušotine (na sloj) veće od 110 bar. Prema podacima iz prve polovice 2009. godine, radom na srednjem tlaku sustava, bušotina je proizvodila prosječno 43 130 m^3/dan plina, 13,03 m^3/dan kondenzata i 2,44 m^3/dan slojne vode uz prosječni tlak na ušću bušotine od 50,77 bar, temperaturu na ušću bušotine 51,65 °C, tlak separatora 28,3 bar i temperaturu separatora 23,3 °C (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2009).

S obzirom na to da je bušotina proizvodila s velikom vrijednošću depresije na sloj (razlike slojnog tlaka i dinamičkog tlaka na dnu bušotine) te činjenicom da takvim režimom rada bušotine dolazi do bržeg zavodnjenja (prodora slojne vode), a time, posljedično, i do bržeg pada i prestanka proizvodnje, manjeg iscrpka plina i kondenzata te preranim napuštanjem bušotine, predloženi su rudarski (stimulacijski radovi) početkom 2009. godine.

Izvršena je interpretacija hidrodinamičkih (HDM) mjerenja iz 2008. godine kada je izmjeren porast tlaka (test porasta tlaka) te su razmotreni mogući radovi na sloju u cilju smanjenja depresije na dnu, odnosno poboljšanja proizvodnih parametara bušotine. Interpretacija je izvedena uz pretpostavku da je proizvodni sloj samo djelomično raskriven, odnosno da je od 18,7 m efektivne debljine sloja raskriveno samo 5 m te je utvrđen veliki pad tlaka uslijed oštećenja (smanjenja propusnosti) pribušotinske zone (Δp_s) od 86,09 bar. Analizom su utvrđene sljedeće vrijednosti oštećenja (*skina*) (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2015):

- mehaničko oštećenje (S_d): 12,5;
- oštećenje uzrokovano djelomičnim raskrivanjem sloja (S_c): 7,73;
- ukupno oštećenje (S): 54,48.

Početkom ožujka 2009. izvršeno je mjerenje proizvodnih količina sa sljedećim rezultatima (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2009):

- proizvodnja plina (q_g): 44 400 m^3/dan,
- proizvodnja slojne vode (q_w): 2,4 m^3/dan,
- dinamički tlak na ušću bušotine (p_{wh}): 54,0 bar,
- temperatura na ušću bušotine (t_{wh}): 52 °C.

Krajem lipnja 2009. godine bušotina je vraćena u sustav visokog tlaka (visoki tlak separatora) te proizvodi prosječno 41 344 m^3/dan plina, 14,08 m^3/dan kondenzata i 2,33 m^3/dan slojne vode uz prosječni tlak na ušću bušotine 68,22 bar, temperaturu na ušću 50,81 °C, tlak separatora 56,3 bar i temperaturu separatora 21,81 °C. Početkom rujna 2009. godine izmjeren je dinamički tlak od 54,5 bar na dubini bušotine od 3230 m (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2009).

4.1.3. Stimulacija sloja bušotine X-1 kemijskom (kiselinskom) obradom

Prije 2009. godine provedena je samo jedna stimulacija kemijskom obradom 1991. godine prilikom koje je kroz postojeću proizvodnu opremu utisnuto 12 m^3 8%-tne Na_4EDTA (etilendiamintetraoctena kiselina) i 10 m^3 inhibiranog ulja. Bušotina je u listopadu 2009. davala prosječno 41 900 m^3/dan plina, 20 m^3/dan kondenzata i 3 m^3/dan slojne vode uz dinamički tlak na ušću od 68 bar. Na temelju HDM-a iz 2008. i primjenom materijalnog balansa procijenjeno je smanjenje ležišnog tlaka na 202 bara u 2009. godini. Razlog zbog kojega je odlučeno izvođenje stimulacijskih radova (obrada sloja) jest činjenica da je, uslijed pada slojnog tlaka, dinamički tlak na ušću bušotine (p_{wh}) pao ispod 60 bar zbog čega bušotina ne može raditi u sustavu visokog tlaka te činjenice je pad tlaka u pribušotinskoj zoni (Δp_s) velik, odnosno postoji veliko oštećenje (*skin*). Kemijskom obradom sloja može se ukloniti samo mehanički *skin* (12,5) te je pretpostavka bila da će se smanjiti sa 12,5 na 4 što bi značilo smanjenje ukupnog *skina* na 22,69 te bi se tada pretpostavljena proizvodnja plina povećala na 69 786 m^3/dan, a kondenzata na 23,8 m^3/dan. Reperforiranje postojećih proizvodnih intervala nije bilo moguće zbog neprohodnosti opreme za perforiranje (nasjeda u opremi) (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2009).

Krajem studenog 2009. godine proveden je kapitalni remont sloja (KRS), odnosno kemijska obrada ležišta „X“ koja se izvodila u dva koraka (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2009):

1) kiselinsko pranje mjesta nasjeda u proizvodnoj opremi (pranje proizvodnog niza) na dubini nasjeda od 3404 m i perforacija sa 2,5 m^3 7,5%-tne klorovodične kiseline (HCl) i aditivima primjenom savitljivog tubinga uz istovremenu cirukulaciju dušikom;
2) kemijska obrada sloja pjenom izrađenom od 6 m^3 7,5%-tne klorovodične kiseline (HCl) i dušika (N_2) uz protiskivanje dušikom.

Neposredno prije početka kiselinske obrade mjereni proizvodni parametri bušotini bili su sljedeći (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2009):

- dinamički tlak na ušću bušotine (p_{wh}): 65 bar,
- proizvodnja plina (q_g): 41 000 m^3/dan,

- proizvodnja kondenzata (q_c): 19 m^3/dan,
- proizvodnja slojne vode (q_w): 2 m^3/dan,
- salinitet slojne vode: 0,233 gNaCl/l.

Nakon kiselinskog pranja, bušotina je, preko mjernog separatora, puštena u rad u sabirni sustav. Obavljena su 24-satna mjerenja proizvodnih količina i tlaka na ušću te su dobiveni sljedeći rezultati (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2009):

- dinamički tlak na ušću bušotine (p_{wh}): 66 bar,
- proizvodnja plina (q_g): 41 650 m^3/dan,
- proizvodnja kondenzata (q_c): 19 m^3/dan,
- proizvodnja slojne vode (q_w): 1,95 m^3/dan,
- salinitet slojne vode: 0,93 gNaCl/l.

Nakon kratkotrajnog čišćenja bušotine od produkata kemijske obrade, bušotina je puštena u rad u sabirni sustav preko mjernog separatora na plinskoj stanici. Izmjereni su sljedeći rezultati kemijske obrade sloja (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2009):

- dinamički tlak na ušću bušotine (p_{wh}): 140 bar,
- proizvodnja plina (q_g): 98 950 m^3/dan,
- proizvodnja kondenzata (q_c): 33,6 m^3/dan,
- proizvodnja slojne vode (q_w): 6,85 m^3/dan,
- salinitet slojne vode: 1,75 gNaCl/l.

Stimulacija kemijskom obradom pokazala se uspješnom, uz neznatno povećanje proizvodnje slojne vode, te su prema mjerenim podacima proizvodni parametri bušotine povećani i to:

- povećanje proizvodnje plina za Δq_g = 57 300 m^3/dan;
- povećanje proizvodnje kondenzata za Δq_c = 14,6 m^3/dan;

dok je dinamički tlak na ušću bušotine porastao za Δp_{wh} = 74 bar. Nakon provedenih stimulacijskih radova, izmjeren je dinamički gradijent tlaka prikazan u tablici 4-5. (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2009).

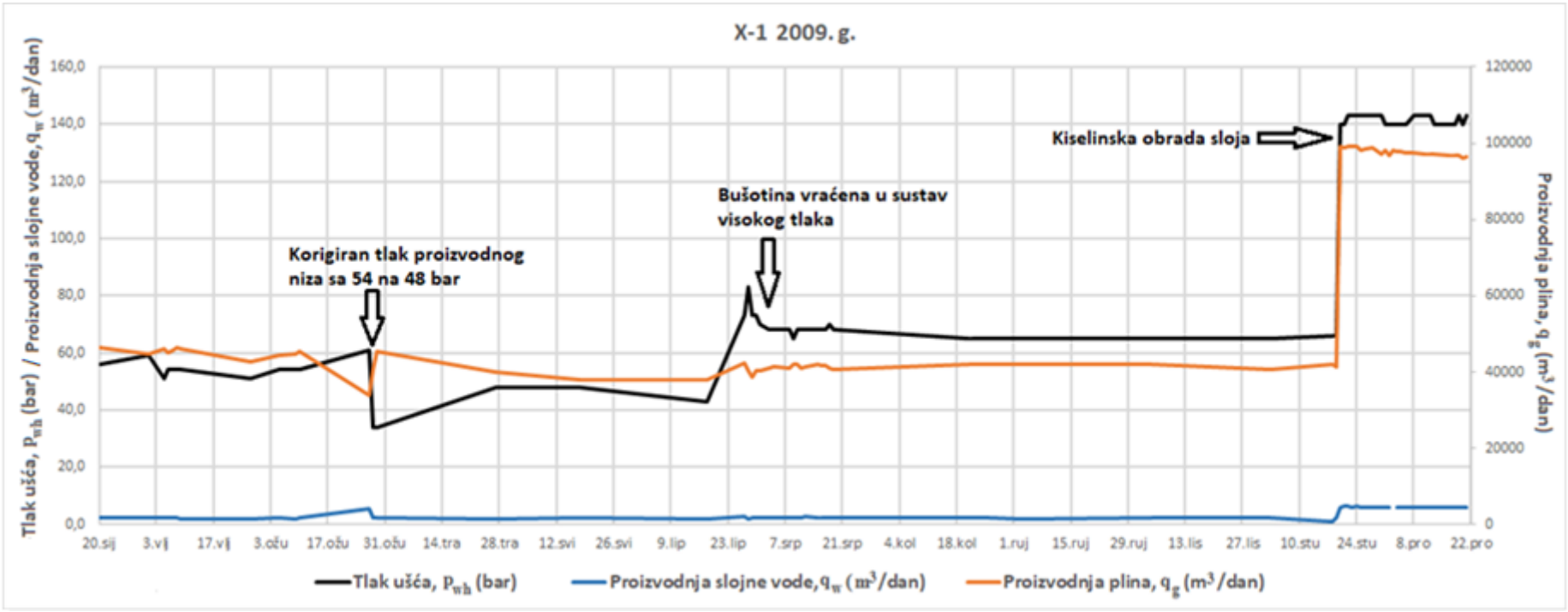
Tablica 4-5. Rezultati mjerenja dinamičkog gradijenta tlaka nakon kemijske obrade 2009. (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2009)

Dinamički gradijent tlaka		
Dubina (H)	**Tlak (P)**	**Gradijent (dP/dH)**
m	**bar**	**bar/m**
5	137,38	
1000	154,88	0,018
2000	170,37	0,015
2500	178,61	0,016
3000	187,11	0,017
3200	190,61	0,018
3300	192,35	0,017
3386	194,10	0,020
Temperatura na dubini mjerenja: 187 °C		

Do kraja 2009. godine bušotina X-1 je imala sljedeće prosječne vrijednosti proizvodnih parametara (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2009):

- proizvodnja plina (q_g): 97 738 m^3/dan,
- proizvodnja kondenzata (q_c): 29,06 m^3/dan,
- proizvodnja slojne vode (q_w): 6,02 m^3/dan,
- dinamički tlak na ušću bušotine (p_{wh}): 141,5 bar,
- temperatura na ušću bušotine (t_{wh}): 80,75 °C,
- tlak separatora (p_{sep}): 56,5 bar,
- temperatura separatora (t_{sep}): 23,25 °C.

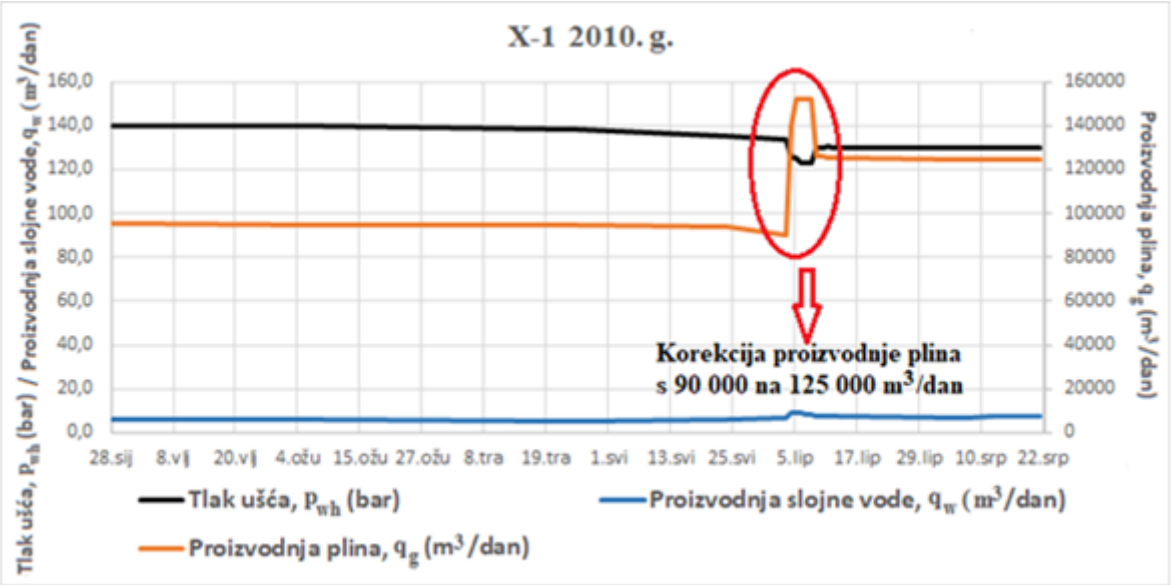
Na slici 4-3. prikazan je trend kretanja proizvodnje plina i slojne vode te tlaka na ušću bušotine X-1 tijekom 2009. godine.



Slika 4-3. Trend kretanja proizvodnje plina i slojne vode te tlaka na ušću bušotine X-1 tijekom 2009. godine (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2009)

4.2. PROIZVODNJA BUŠOTINE X-1 NAKON KEMIJSKE OBRADE 2009. GODINE

Početkom lipnja 2010. izvršena je korekcija proizvodnje plina, odnosno smanjenje tlaka na ušću bušotine, a time i dinamičkog tlaka na dnu bušotine, otvaranjem sapnice što je rezultiralo povećanjem proizvodnje sa 90 000 m^3/dan na 125 000 m^3/dan što je i prikazano na slici 4-4. (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2010).



Slika 4-4. Trend kretanja proizvodnje plina i slojne vode te tlaka na ušću bušotine X-1 tijekom 2010. godine (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2010)

Sredinom 2015. g. obavljeno je hidrodinamičko mjerenje prema tablici 4-6. tijekom kojega je izmjeren dinamički gradijent tlaka (tablica 4-7.), proveden test protoka i porasta tlaka (slika 4-5.), mjerenje dinamičkog tlaka i temperature na ušću bušotine (slika 4-6.), mjerenje proizvodnih količina visokotlačnim separatorom na bušotini (tablica 4-8.) i mjernim separatorom na plinskoj stanici (tablica 4-9.) te uzimanje uzoraka slojne vode za fizikalno-kemijsku analizu čiji su rezultati prikazani u tablicama 4-10. i 4-11. Proizvodni parametri prije početka mjerenja imali su sljedeće vrijednosti (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2015):

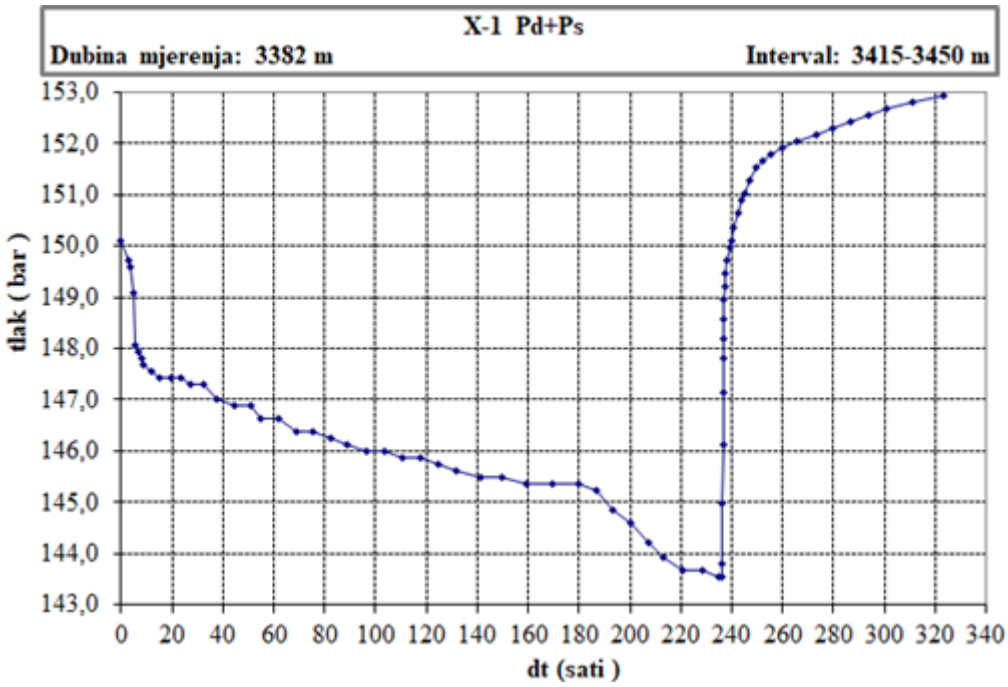
- dinamički tlak na ušću bušotine (p_{wh}): 93 bar,
- proizvodnja plina (q_g): 134 200 m^3/dan,
- proizvodnja kondenzata (q_c): 31,6 m^3/dan,
- proizvodnja slojne vode (q_w): 10,6 m^3/dan.

Tablica 4-6. Plan hidrodinamičkog mjerenja 2015. godine (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2015)

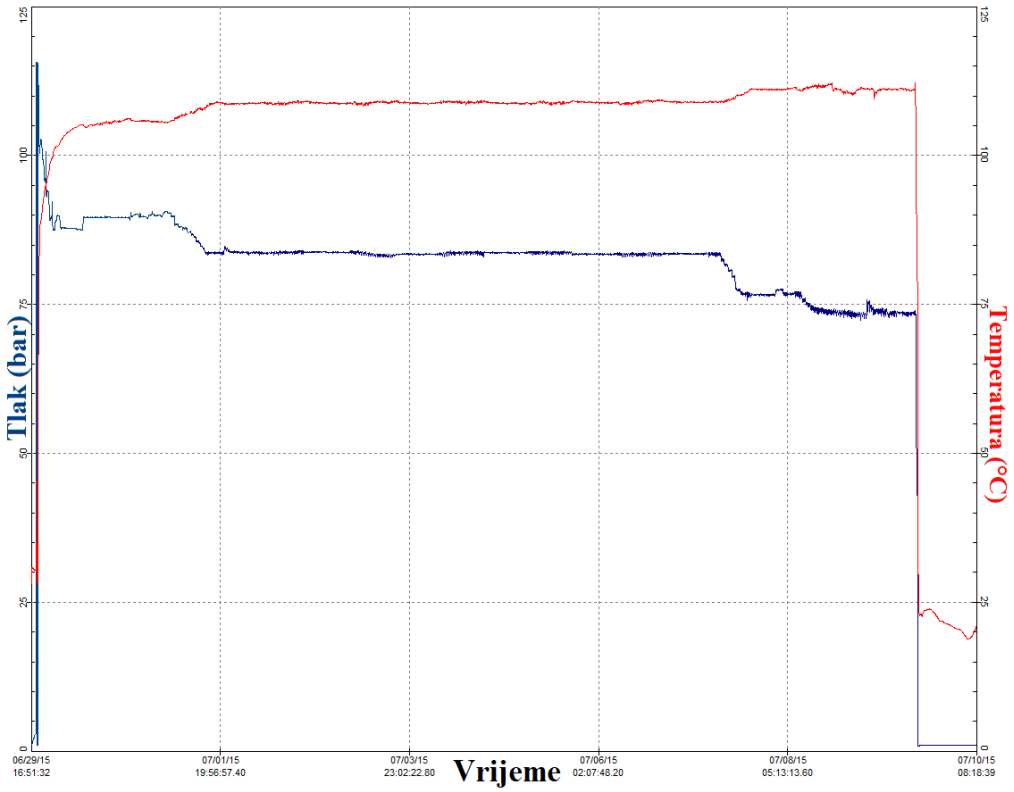
R. br. uvjeta	Trajanje uvjeta, sati	Očekivani tlak, bar		Očekivana temperatura, °C		Očekivana proizvodnja, m^3/dan			Napomena
		ušće	dno 3382 m	ušće	dno 3382 m	kond.	plin	voda	
1		95	153	52	166	39	134 000	10	dinamički gradijent
2	24	95	153	52	166	39	134 000	10	I. uvjet (trenutni proizvodni uvjet)
3	72	83	149	52	166	55	188 000	14	II. uvjet
4	72	70	146	52	166	66	227 000	18	III. uvjet
5	72	55	143	52	166	75	257 000	20	IV. uvjet
6		55	143	52	166	75	257 000	20	dinamički gradijent
7	170	100	158	52	166	0	0	0	porast tlaka

Tablica 4-7. Izmjereni dinamički gradijent tlaka tijekom HDM-a 2015. godine (Tehnička dokumentacija Crosco, d.o.o., 2015)

Dubina	Tlak	dP/dH	Temperatura
m	bar	bar/m	°C
5	88,09		108,4
1000	103,05	0,15	142,7
2000	121,95	0,19	162,3
2500	130,78	0,18	169,8
3000	138,86	0,16	175,3
3200	142,25	0,17	176,9
3300	144,19	0,19	177,8
3350	144,91	0,15	178,0
3398	145,64	0,15	178,2



Slika 4-5. Dijagram rezultata mjerenja protoka (P_d – dinamički tlak) i porasta tlaka (P_s – statički tlak) tijekom HDM-a 2015. (Tehnička dokumentacija Crosco, d.o.o., 2015)



Slika 4-6. Dinamički tlak i temperatura na ušću bušotine tijekom HDM-a 2015. (Tehnička dokumentacija, Crosco, d.o.o., 2015)

Tablica 4-8. Izmjereni proizvodni parametri visokotlačnim separatorom na bušotini X-1 (Tehnička dokumentacija Crosco, d.o.o., 2015)

	I. uvjet		II. uvjet						III. uvjet		
Datum	29.lip	30.lip	1.srp	2.srp	3.srp	4.srp	5.srp	6.srp	7.srp	8.srp	9.srp
p_{wh} (bar)	92 -86	88 - 89	88 - 89	83	83 - 82	82 - 83	82 - 83	82 - 83	82 - 76,1	76,8 - 71,7	73
p_{sep} (bar)	68	66	66 - 68	69	68,4	68,1	68,1	68,2	69	69	68
t_{sep} (°C)	50 - 47	51 - 50	51 - 47	48 - 46	46 - 45	46 - 43	43	45	45 - 48	47	45
q_g (m^3/dan)	131996	128006	136182	131383	127604	127923	128370	127728	135082	143986	140039
q_c (m^3/dan)	46,3	34,23	40	40,5	40,59	40,97	41,02	40,85	43,57	46,63	46,272
q_w (m^3/dan)	12,23	9,45	10,48	11,16	11	10,86	11,25	11,03	11,8	12,97	14,064
WGR (cm^3/m^3)	92,65	73,82	76,96	84,94	86,20	84,89	87,64	86,36	87,35	90,08	100,43
Salinitet (gNaCl/l)	0,12	0,12	0,93	1,25	1,46	1,54	1,57	1,63	2,16	2,28	2,48

Tablica 4-9. Mjerenje proizvodnih količina mjernim separatorom na plinskoj stanici (Tehnička dokumentacija Crosco, d.o.o., 2015)

Bušotina	**X-1**
Datum mjerenja	29.06.2015.
p_{wh} (bar)	93
t_{wh} (°C)	105
q_g (m^3/d)	133400
q_c (m^3/d)	47,4
q_w (m^3/d)	10,5

Tablica 4-10. Rezultati mjerenja saliniteta više uzoraka slojne vode (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2015)

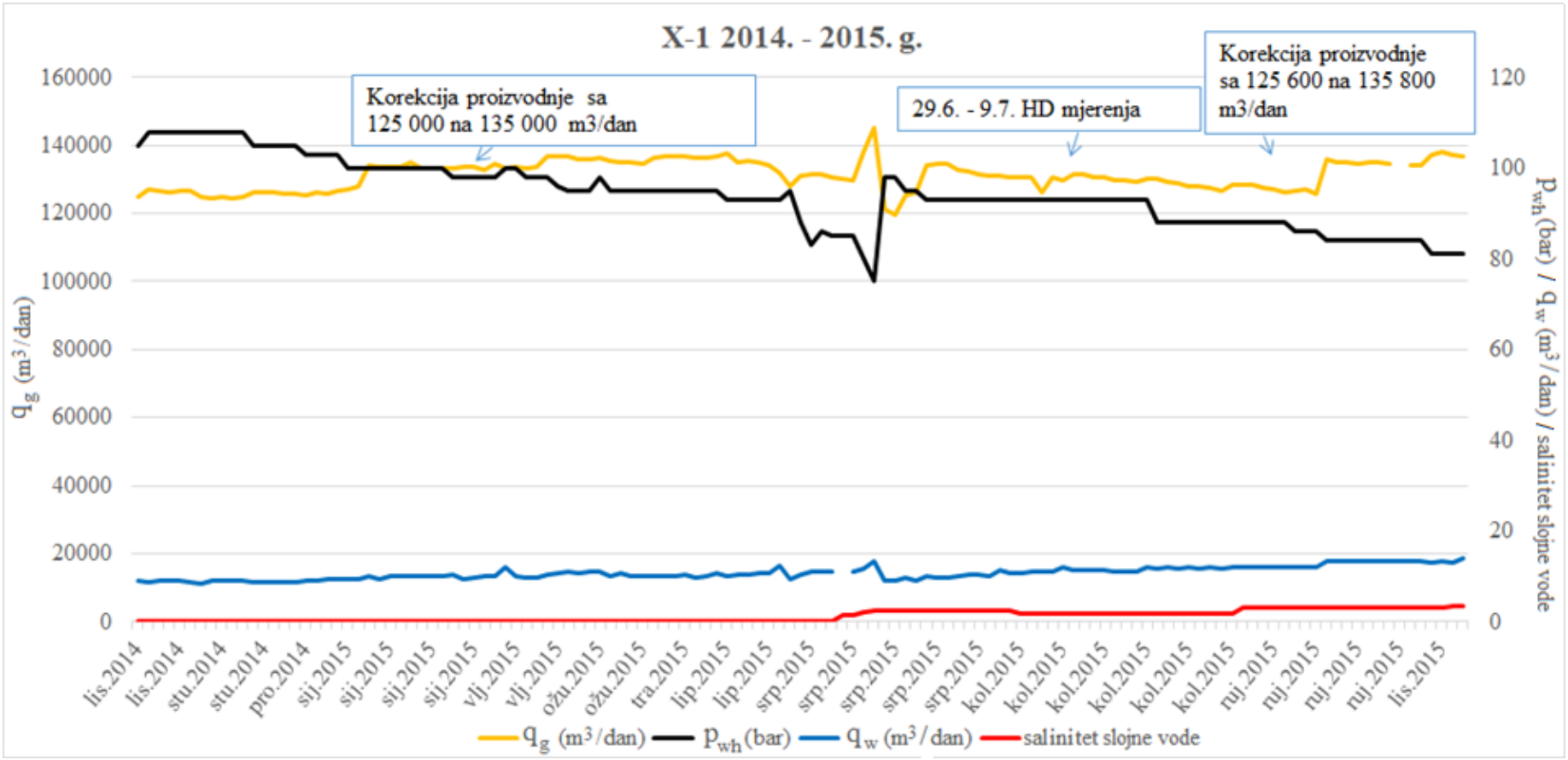
Lab. br. uzorka	Datum uzorkovanja	Vrijeme uzorkovanja	Salinitet g/dm^3
1073	3.7.2015.	12 h	1,28
1074	3.7.2015.	24 h	1,34
1075	4.7.2015.	12 h	1,46
1076	4.7.2015.	24 h	1,50
1077	5.7.2015.	12 h	1,52
1078	5.7.2015.	24 h	1,56
1079	6.7.2015.	6 h	1,58
1080	6.7.2015.	10:30 h	1,60
1119	8.7.2015.	16 h	2,46
1120	8.7.2015.	24 h	2,50
1121	9.7.2015.	9 h	2,54
1122	9.7.2015.	10:30 h	2,56

Tablica 4-11. Izmjerena fizikalno-kemijska svojstva slojne vode 2015. godine (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2015)

Parametar	Jedinica	Lab. br. 1122
Gustoća	kg/dm^3	1,0062
Salinitet	mg/dm^3	2560
Natrij klorid (NaCl)	mg NaCl/dm^3	2406
Klorid (Cl^-)	mg/dm^3	1456
Ukupna tvrdoća	mg $CaCO_3$/dm^3	90
Kalcij (Ca^{2+})	mg/dm^3	31,2
Kalcijeva tvrdoća	mg $CaCO_3$/dm^3	78
Magnezij (Mg^{2+})	mg/dm^3	2,8
Magnezijeva tvrdoća	mg $CaCO_3$/dm^3	12
Sulfid (S^{2-})	mg/dm^3	1,32
Sulfat (SO_4^{2-})	mg/l	<40
pH		5,90
Željezo (Fe^{2+})	mg/dm^3	16,4
Ukupno željezo (Fe)	mg/dm^3	16,6
Ugljik dioksid, otopljeni (CO_2)	mg/dm^3	424

Trend kretanja proizvodnje tijekom 2014. i 2015. godine prikazan je dijagramom na slici 4-7., a proizvodni parametri su imali sljedeće prosječne vrijednosti (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2015):

- proizvodnja plina (q_g): 131 306 m^3/dan,
- proizvodnja kondenzata (q_c): 31,9 m^3/dan,
- proizvodnja slojne vode (q_w): 10,7 m^3/dan,
- dinamički tlak na ušću bušotine (p_{wh}): 94,1 bar,
- temperatura na ušću bušotine (t_{wh}): 101,8 °C,
- tlak separacije (p_{sep}): 49,5 bar,
- temperatura separacije (t_{sep}): 41,5 °C,
- salinitet slojne vode: 1,2 gNaCl/l.



Slika 4-7. Trend kretanja proizvodnje bušotine X-1 tijekom 2014. i 2015. godine (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2015)

4.3. KAPITALNI REMONT SLOJA I OPREME BUŠOTINE X-1 2016. GODINE

Do sredine ožujka 2016. godine bušotina je proizvodila prosječno 140 000 m^3/dan plina uz konstantu proizvodnju slojne vode od 15 m^3/dan i kondenzata od 55 m^3/dan te konstantan tlak na ušću bušotine od 79 bar. Bušotina je neposredno prije radova, koji su trajali tijekom ožujka i travnja, davala 133 400 m^3/dan plina, 54 m^3/dan kondenzata i 12 m^3/dan slojne vode uz dinamički tlak na dnu bušotine od 144,2 bar i tlak na ušću bušotine od 88 bar. Stanje ležišta i ležišnog fluida bilo je sljedeće (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2016):

- ležišna temperatura (T_R): 178 °C;
- ležišni tlak (p_R): 153 bar;
- relativna gustoća plina (γ_g): 0,45;
- relativna gustoća ležišnog fluida (plin + kondenzat + voda) (γ_{smjese}): 0,9664;
- udio neugljikovodičnih komponenti u smjesi plina:
  - ugljikov dioksid (CO_2): 11,92%;
  - dušik (N_2): 1,34%;
  - sumporovodik (H_2S): 70 ppm;
  - živa (Hg): 0,5 mg/m^3.

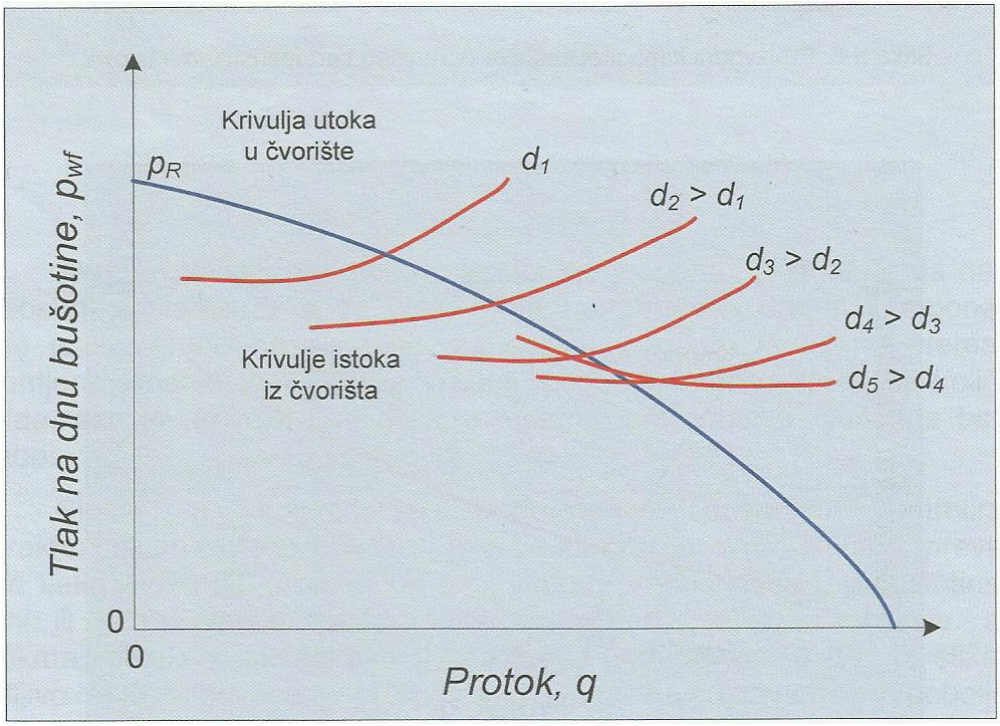
Slučaj bušotine X-1 razlikuje se od teoretskih pravila proizvodnje koja upućuju na potrebu smanjivanja promjera proizvodnog niza tijekom radnog vijeka bušotine. Bušotina X-1 je 27 godina proizvodila kroz uzlazni niz nazivnog promjera 73 mm ($2^7/_8$”), no 2016. godine nakon analize i reinterpretacije karotažnih mjerenja, odlučeno je privesti u proizvodnju i gornje slojeve te, zbog većih proizvodnih količina, povećati promjer proizvodnog niza na 88,9 mm ($3^1/_2$”) (Tišljar i Zelić, 2016).

4.3.1. Analiza promjene promjera proizvodnog niza

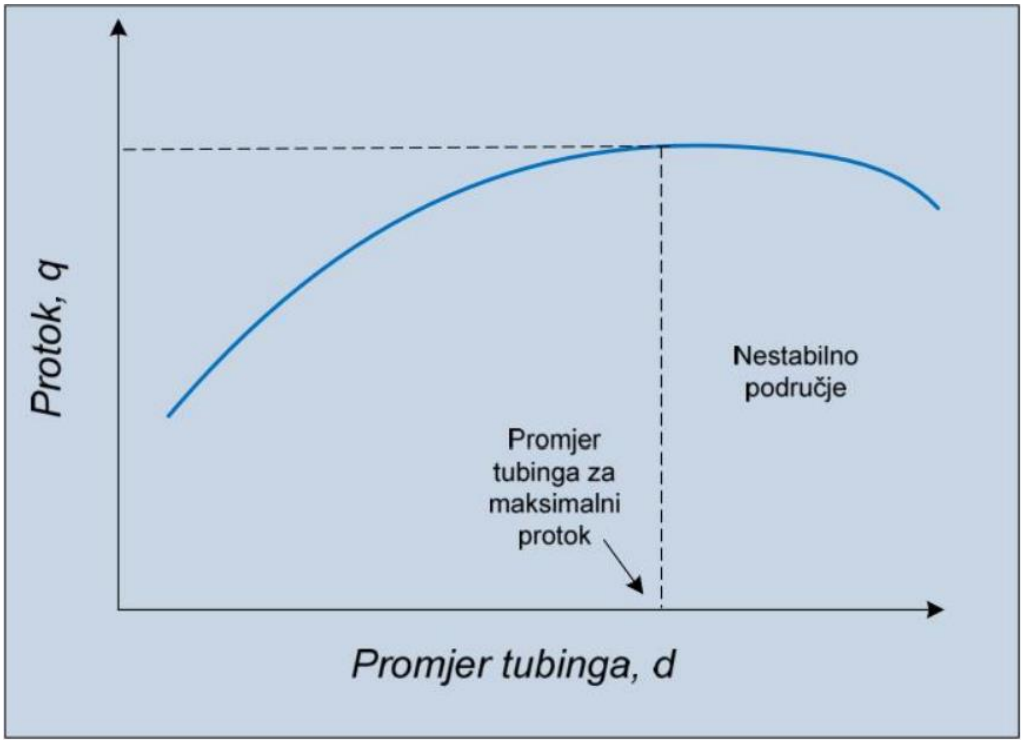
Odabir optimalnog unutarnjeg promjera proizvodnog niza cijevi (tubinga) izvodi se na temelju čvorišne analize, pri čemu je cilj za što dulje razdoblje odabrati optimalni i ekonomski najpovoljniji proizvodni niz. Prilikom proračuna je potrebno uzeti u obzir sljedeće (Tišljar i Zelić, 2016):

- promjene tlaka na ušću bušotine,
- promjene udjela slojne vode u proizvodnji s vremenom,
- promjene omjera proizvedenog kondenzata i plina (CGR),
- snižavanje ležišnog tlaka s vremenom.

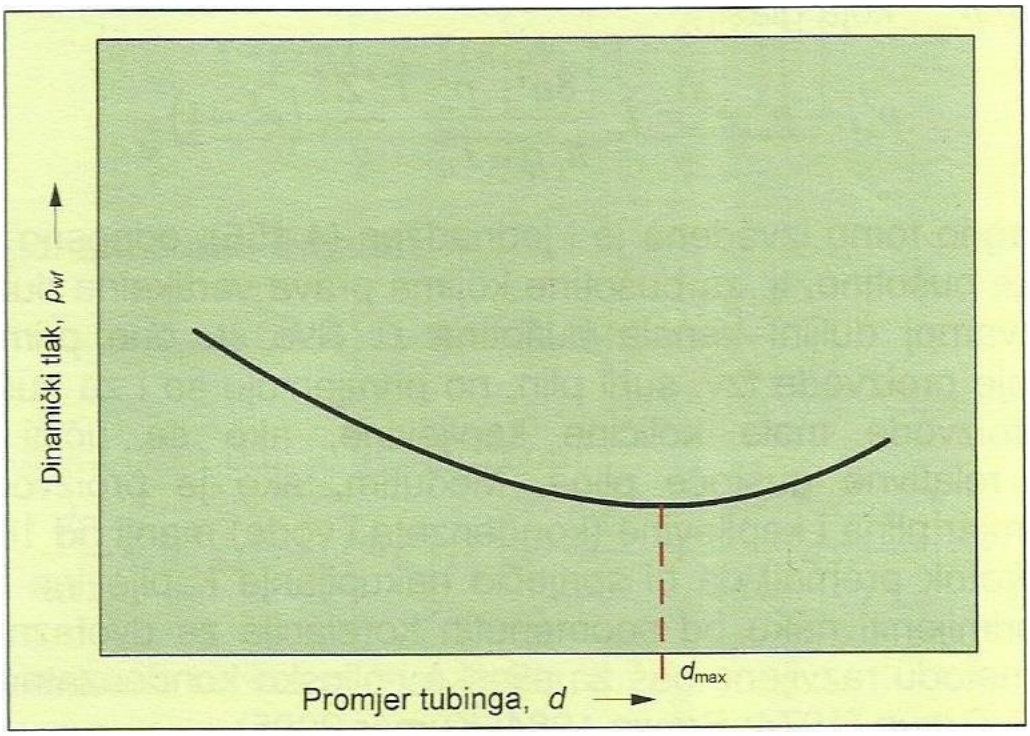
Ako je unutarnji promjer proizvodnog niza prevelik, brzina protjecanja fluida u njemu može biti premala za djelotvorno iznošenje kapljevite faze na površinu što je posljedica prevelikog promjera proizvodnog niza i/ili premalog protoka fluida. S povećanjem promjera proizvodnog niza, do određene granice, smanjuje se dinamički tlak na dnu bušotine zbog čega se povećava protok (dotok fluida iz ležišta). Nakon dosezanja granične vrijednosti, daljnjim povećanjem promjera dolazi do povećanja dinamičkog tlaka na dnu bušotine i protok postaje nestabilan (isprekidan) uslijed zaostajanja kapljevine u bušotini kao što je prikazano na slikama 4-8., 4-9. i 4-10. Odabire se maksimalni promjer proizvodnog niza koji omogućava maksimalni protok kapljevine (Čikeš, 2015).



Slika 4-8. Utjecaj promjene unutarnjeg promjera proizvodnog niza na kapacitet proizvodnog sustava (Čikeš, 2015)



Slika 4-9. Odabir optimalnog promjera proizvodnog niza s obzirom na maksimalni protok (Čikeš, 2015)



Slika 4-10. Utjecaj promjene unutarnjeg promjera proizvodnog niza na dinamički tlak na dnu bušotine (Čikeš, 2015)

Kod plinsko-kondenzatnih bušotina struktura protjecanja pretežno je magličasta (*engl. mist flow*), odnosno plin čini kontinuiranu fazu dok je kapljevita faza raspršena u obliku kapljica u plinovitoj fazi, pa je klizanje među fazama minimalno (Mršić, 2006) te je proračun optimalnog promjera proizvodnog niza posebno bitan zbog sljedeća dva čimbenika (Tišljar i Zelić, 2016):

- kritična (Turnerova) brzina i
- granična brzina protoka.

Kritična ili Turnerova brzina (*engl. gas unloading velocity*) predstavlja minimalnu brzinu protjecanja plina potrebnu za učinkovito iznošenje kapljevite faze (vode i kondenzata) s dna bušotine na površinu. U slučaju premale brzine dolazi do nakupljanja (zaostajanja) kapljevite faze, povećanja gustoće smjese u proizvodnom nizu, a time i do većeg dinamičkog tlaka na dnu, odnosno manje depresije te na kraju može doći i do samougušenja bušotine (Tišljar i Zelić, 2016). Da bi se spriječilo nakupljanje kondenzata i slojne vode na dnu bušotine, potrebno je odabrati unutarnji promjer proizvodnog niza koji će osigurati brzinu

protjecanja smjese fluida dovoljnu za iznošenje kapljevine. S obzirom na to da se gustoće kondenzata i slojne vode razlikuju, potrebno je postići različite brzine iznošenja (veća će biti za iznošenje slojne vode) (Brkić i Tišljar, 2018). Računa se pomoću korelacija, no uobičajene preporučene vrijednosti kada se ne koriste korelacije su (Mohamed, 2014):

- minimalna brzina iznošenja za slojnu vodu: 2,13 m/s,
- minimalna brzina iznošenja za kondenzat: 1,22 m/s.

Prema Beggsu (1985) minimalna brzina protoka plina za pokretanje slojne vode računa se pomoću sljedeće formule:

$$v_{gw} = 1{,}23 \cdot \frac{\left(\frac{\rho_w}{16} - 0{,}0405 \cdot p_{wh}\right)^{0{,}25}}{(0{,}0405 \cdot p_{wh})^{0{,}5}} \tag{4-1}$$

gdje su:

v_{gw} - minimalna (kritična) brzina protoka plina za pokretanje slojne vode, m/s

ρ_w - gustoća slojne vode, kg/m^3

p_{wh} - dinamički tlak na ušću bušotine, Pa

Coleman et al. (1991) daje modificiranu Turnerovu kritičnu brzinu koja se računa s obzirom na vrijednost dinamičkog tlaka na ušću bušotine:

- za vrijednosti dinamičkog tlaka na ušću ispod 34,5 bar koristi se korelacija Coleman et al.:

$$v_{gl} = 0{,}0432 \cdot \frac{{\sigma_{lg}}^{0{,}25} \cdot \left(\rho_l - \rho_g\right)^{0{,}25}}{{\rho_g}^{0{,}5}} \tag{4-2}$$

- za vrijednosti dinamičkog tlaka na ušću iznad 34,5 bar koristi se korelacija Turner et al.:

$$v_{gl} = 0{,}0518 \cdot \frac{{\sigma_{lg}}^{0{,}25} \cdot \left(\rho_l - \rho_g\right)^{0{,}25}}{{\rho_g}^{0{,}5}} \tag{4-3}$$

gdje su:

v_{gl} - minimalna (kritična) brzina protoka plina za iznošenje kapljevine, m/s

σ_{lg} - površinska napetost slojna voda/plin ili kondenzat/plin pri uvjetima na ušću bušotine, N/m

ρ_l - gustoća slojne vode ili kondenzata pri uvjetima na ušću bušotine, kg/m^3

ρ_g - gustoća plina pri uvjetima na ušću bušotine, kg/m^3.

Granična brzina protoka odnosi se na maksimalnu brzinu pri kojoj još ne dolazi do erozije unutarnje stijenke proizvodnog niza. Graničnu brzinu protoka potrebno je, dakle, proračunati kako bi se izbjegla erozija pri čemu je bitan faktor „C“ čije vrijednosti variraju ovisno o vrsti materijala (čelika), uputama proizvođača i preporučenoj praksi (Tišljar i Zelić, 2016). Američki institut za naftu (API, *engl. American Petroleum Institute*) publicirao je jednadžbu kojom se određuje maksimalna brzina protoka smjese fluida pri kojoj neće doći do erozije cijevi, a temelji se na „C“ faktoru koji je dobiven eksperimentalno. Prema API RP 14E (1991) brzina kod koje još neće doći do oštećenja cijevi kod dvofaznog protoka je:

$$v_e = \frac{C}{\sqrt{\rho_m}} \tag{4-4}$$

gdje su:

v_e - brzina smjese fluida koja će uzrokovati eroziju (granična brzina protoka), m/s

C - empirijska konstanta, -

ρ_m - gustoća smjese fluida, kg/m^3.

Vrijednosti faktora „C“ su sljedeće (Ankur, 2011):

- kod proizvodnje fluida bez čvrstih čestica: C = 122;
- kod proizvodnje fluida bez čvrstih čestica i gdje se ne očekuje korozija (gdje je kontrolirana inhibitorima ili primjenom legura otpornih na koroziju): C = 183 - 244;
- kod prisutnosti čvrstih čestica u proizvodnom fluidu (brzine protoka su značajno smanjenje), C se treba odrediti testiranjima.

Ako proizvodni fluid sadrži i pijesak, granična brzina protoka je sljedeća (API RP 14E, 1991):

$$v_e = \frac{S' \cdot d \cdot \sqrt{\rho_m}}{\sqrt{w}} \tag{4-5}$$

gdje su:

v_e - brzina smjese fluida koja će uzrokovati eroziju (granična brzina protoka), m/s

S´ - konstanta ovisna o geometriji cijevi dobivena na temelju eksperimentalnih podataka, -

d - unutarnji promjer cijevi, m

ρ_m - gustoća smjese fluida, kg/m^3

w - maseni protok pijeska (kg/dan).

Univerzalna jednadžba za graničnu brzinu protoka koja se primjenjuje u proizvodnji nafte i plina je sljedeća (API RP 14E, 1991):

$$v_e = \frac{d \cdot \sqrt{\rho_m}}{20 \cdot \sqrt{w}} \tag{4-6}$$

gdje su:

v_e - brzina smjese fluida koja će uzrokovati eroziju (granična brzina protoka), m/s

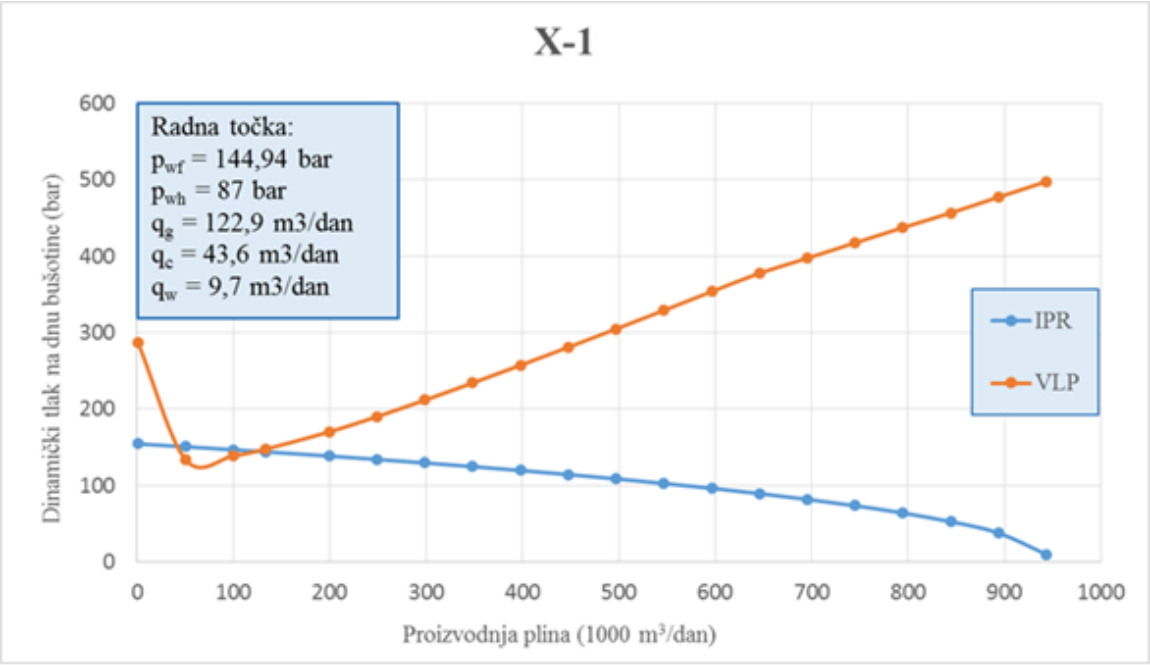
d - unutarnji promjer cijevi, m

ρ_m - gustoća smjese fluida, kg/m^3

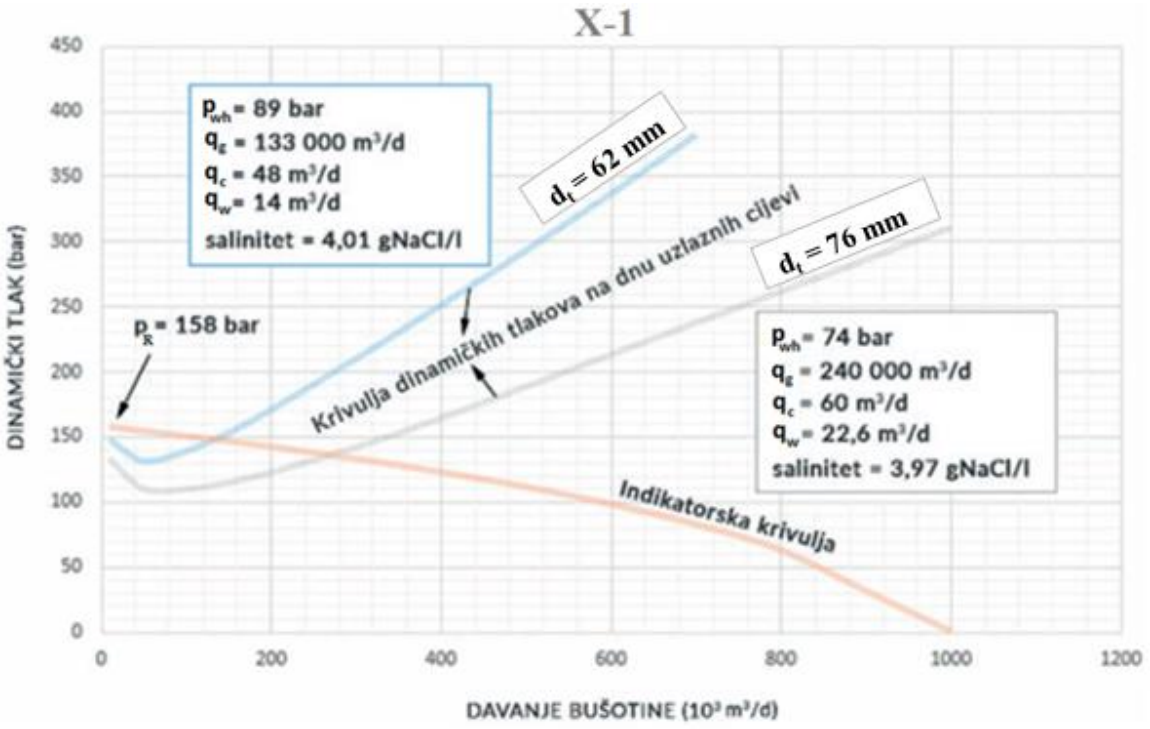
w - maseni protok pijeska (kg/dan).

U računalnom programu Prosper provode se proračuni odabira promjera proizvodnog niza i analize proizvodnog sustava u kojima se mijenjaju različite varijable koje se odnose na različite moguće uvjete proizvodnje koji se mogu pojaviti tijekom proizvodnog vijeka bušotine. Rezultat proračuna jesu radne točke sustava (sjecišta IPR i VLP krivulja) za različite promjere proizvodnog niza. Radne točke daju proizvodne količine za dane vrijednosti promjera i ležišnog tlaka, pa se prema tome i određuje optimalni promjer za dane uvjete. Provedena je analiza utjecaja povećanja unutarnjeg promjera proizvodnog niza (sa 62 mm na 76 mm) te perforiranja gornjih intervala, odnosno povećanja efektivne debljine ležišta (s 18,7 m na 52,1 m). Na slici 4-11. prikazana je radna točka sustava prije remontnih radova, na slici 4-12. prikazane su radne točke za različite promjere proizvodnog niza bez perforiranja gornjih intervala, dok su u tablici 4-12. prikazani rezultati analize osjetljivosti na promjene promjera proizvodnog niza u kombinaciji s povećanjem debljine ležišta (perforiranje novih intervala). Na temelju provedenih analiza odabran je proizvodni niz vanjskog promjera 88,9 mm (unutarnjeg promjera 76 mm) i povećanje efektivne debljine

ležišta na 52,1 m perforiranjem gornjih intervala te je dobivena prognoza proizvodnog kapaciteta (radne točke) sustava nakon provedenih radova prikazana na slici 4-13.



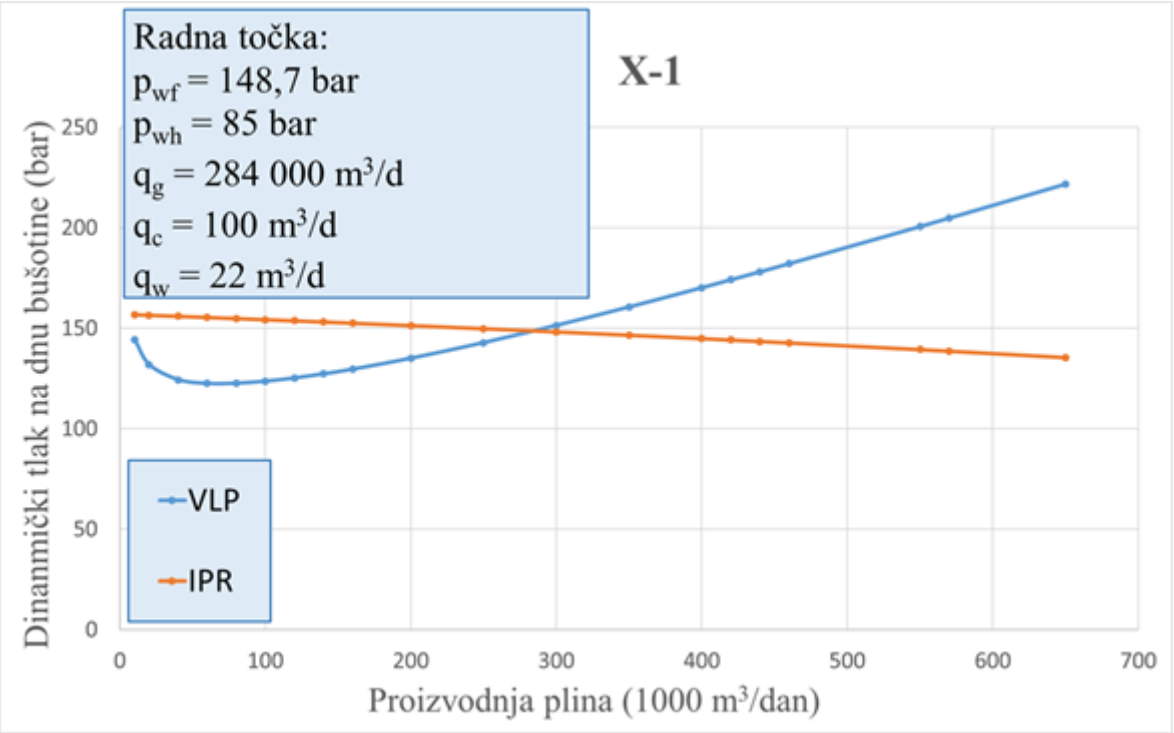
Slika 4-11. Radna točka sustava prije ugradnje većeg proizvodnog niza i perforiranja gornjih intervala



Slika 4-12. Utjecaj povećanja promjera proizvodnog niza na radnu točku sustava bez perforiranja gornjih intervala (Tišljar i Zelić, 2016)

Tablica 4-12. Rezultati analize utjecaja promjene promjera proizvodnog niza u kombinaciji s perforiranjem gornjih intervala (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2016)

X-1	Postojeći donji intervali	Samo gornji intervali		Gornji i donji intervali	
Propusnost, k 10^{-3} μm^2 (mD)	8,50	10,20		9,59	
Debljina ležišta, h (m)	32	85		117	
Perforacije (m)	3415-3440, 3443-3450	3310-3395		3415-3440, 3443-3450 i 3310-3395	
Efektivna debljina ležišta, h_{ef} (m)	3,7 + 15 (**18,7**)	**33,7**		**52,4**	
Pad tlaka u proizvodnom nizu, Δp_t (bar)	56,82	64,73	59,75	67,21	63,73
Vanjski promjer proizvodnog niza (m)	**2 7/8''** (0,073)	**2 7/8''** (0,073)	**3 1/2''** (0,089)	**2 7/8''** (0,073)	**3 1/2''** (0,089)
Unutarnji promjer proizvodnog niza (m)	0,06197	0,06197	0,076	0,06197	0,076
Proizvodnja plina, q_g (1000m^3/dan)	133,744	163,361	261,083	171,224	284,241
Proizvodnja slojne vode, q_w (m^3/dan)	10,5	12,9	20,5	13,5	22,4
Proizvodnja kondenzata, q_c (m^3/dan)	47,5	58	92,8	60,8	101
Dinamički tlak na ušću bušotine, p_{wh} (bar)	88	85	85	85	85
Dinamički tlak na dnu bušotine, p_{wf} (bar)	144,82	149,73	144,75	152,21	148,73



Slika 4-13. Prognoza radne točke sustava nakon provedenih remontnih radova

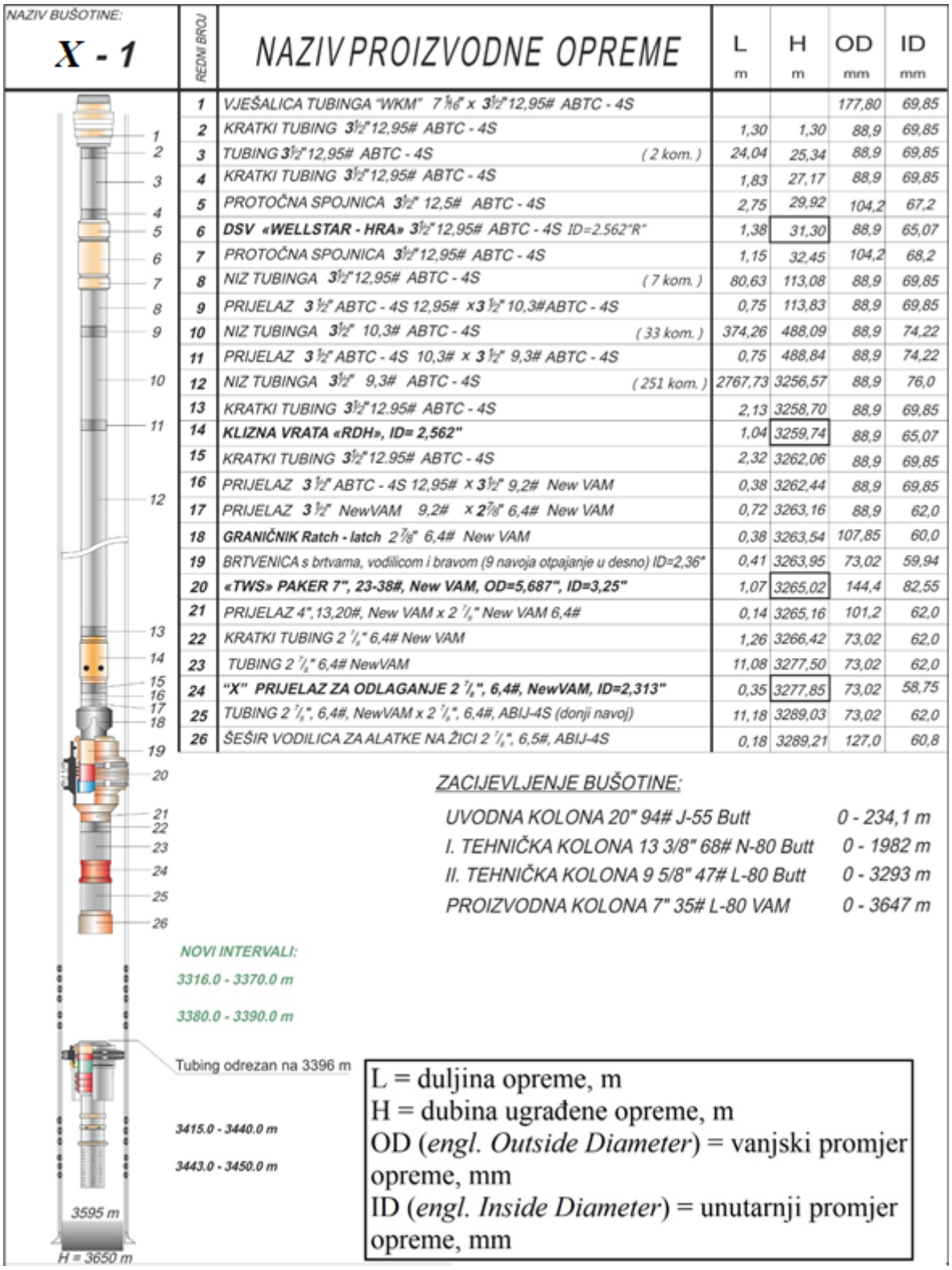
4.3.2. Kapitalni remont opreme – ugradnja novog proizvodnog niza većeg promjera

Kapitalni remont opreme (KRO) je započeo gušenjem bušotine direktnim utiskivanjem demineralizirane vode u sloj i protiskivanjem gela i kredofilnog čepa s ciljem saniranja gubitaka radnog fluida tijekom obavljanja radova. Kao radni (servisni) fluid koristila se 3%-tna vodena otopina kalijevog klorida (KCl). Pošto je proizvodni niz bio zapunjen kredofilom, pristupilo se ispiranju viška kredofila do dubine ispod pakera korištenjem savitljivog tubinga uz primjenu gela i vode. Zbog neuspjelog pokušaja otvaranja kliznih vrata iznad pakera za cirkulaciju, pristupilo se perforiranju proizvodnog niza te se direktnim utiskivanjem zamijenilo inhibirano ulje (servisni fluid iznad pakera u prstenastom prostoru – „paker fluid“) s radnim fluidom. Nakon toga se pristupilo vađenju opreme iz bušotine uz kontinuirano nadopunjavanje bušotine radnim fluidom (obrađenom vodom s 3% KCl-a) (Tehnička dokumentacija Crosco, d.o.o., 2016).

Primjenom projektiranog natega proizvodnog niza od 65 tona nije bilo moguće osloboditi brtvenicu iz permanentnog pakera, pa je proizvodni niz odrezan sa kumulativnim rezačem neposredno iznad pakera. Nakon što su ostala dubinska oprema i proizvodni niz $2^{7}/_{8}$" (73,025 mm) izvađeni iz bušotine, ugrađen je skreper (strugač, čistač kolone) na nizu bušaćih šipki i bušotina je pročišćena do vrha odrezanog proizvodnog niza i isprana indirektnom cirkulacijom (Tehnička dokumentacija Crosco, d.o.o., 2016). Prema projektu ugrađena je nova proizvodna oprema kao što je prikazano na slici 4-14.

S obzirom na to da je tijekom godina proizvodnje ležišni tlak značajno pao u odnosu na početni, a time i proizvodne količine, primijenjen je manje zahtjevan i jeftiniji sustav fiksne veze pakera s proizvodnim nizom koji pri trenutnim uvjetima proizvodnje zadovoljava dopuštena naprezanja proizvodnog niza (Tišljar i Zelić, 2016). Ugrađen je *Halliburton „TWS“ Ratch-Latch* permanentni paker na kablu i usadna brtvenica, novi proizvodni niz vanjskog promjera 88,9 mm ($3^{1}/_{2}$”) s četverostruko brtvećim plinotijesnim navojem (*ABTC-4S*) do dubine od 3289,21 m i dubinski sigurnosni ventil (DSV) s kontrolnim vodom (Tehnička dokumentacija Crosco, d.o.o., 2016).

Nakon toga je provedeno kemijsko (kiselinsko) pranje primjenom savitljivog tubinga sa 12 m^3 15%-tne vodene otopine klorovodične kiseline (HCl) s ciljem otapanja kredofila. Bušotina je osvojena i očišćena od ostataka reakcije kiseline s kredofilom utiskivanjem dušika i zatim spojena na sabirni sustav pri čemu je izmjeren tlak na ušću bušotine od 94 bar i tlak prstenastog prostora od 84 bar (Tehnička dokumentacija Crosco, d.o.o., 2016).



Slika 4-14. Nova ugrađena proizvodna oprema bušotine X-1 nakon kapitalnog remonta opreme 2016. godine (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2016)

4.3.3. Perforiranje novih gornjih proizvodnih intervala

Perforiranje je izvršeno kroz ugrađenu proizvodnu opremu na kablu perforatorom *Bolted Gun*, gustoćom perforacija od 20 perforacija po metru (6 SPF; *engl. Shots per Foot*). U tablici 4-13. prikazani su postojeći i novi perforirani proizvodni intervali, a u tablici 4-14. karakteristike primijenjenog perforatora, odnosno izrađenih perforacija. Nakon perforiranja novih gornjih intervala izmjeren je tlak na ušću bušotine od 97-98 bar kod promjera otvora podesive sapnice od 12,7 mm te 79-80 bar kod promjera 15 mm (Tehnička dokumentacija Crosco, d.o.o., 2016).

Tablica 4-13. Prikaz postojećih i novih proizvodnih intervala (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2016)

		Debljina intervala
Postojeći proizvodni intervali	3450,0 - 3443,0 m	7,0 m
	3440,0 - 3415,0 m	25,0 m
Novi proizvodni intervali	3390,0 - 3380,0 m	10,0 m
	3370,0 - 3316,0 m	54,0 m

Tablica 4-14. Karakteristike perforatora i izrađenih perforacija (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2016)

Promjer puške perforatora	53,975 mm (2 1/8")
Faza	60°
Radna temperatura	190 °C
Promjer ulaznog otvora perforacije	6,096 mm (0,24")
Penetracija (duljina perforacije)	0,492 m (19,38")

4.3.4. Rezultati provedenih rudarskih radova

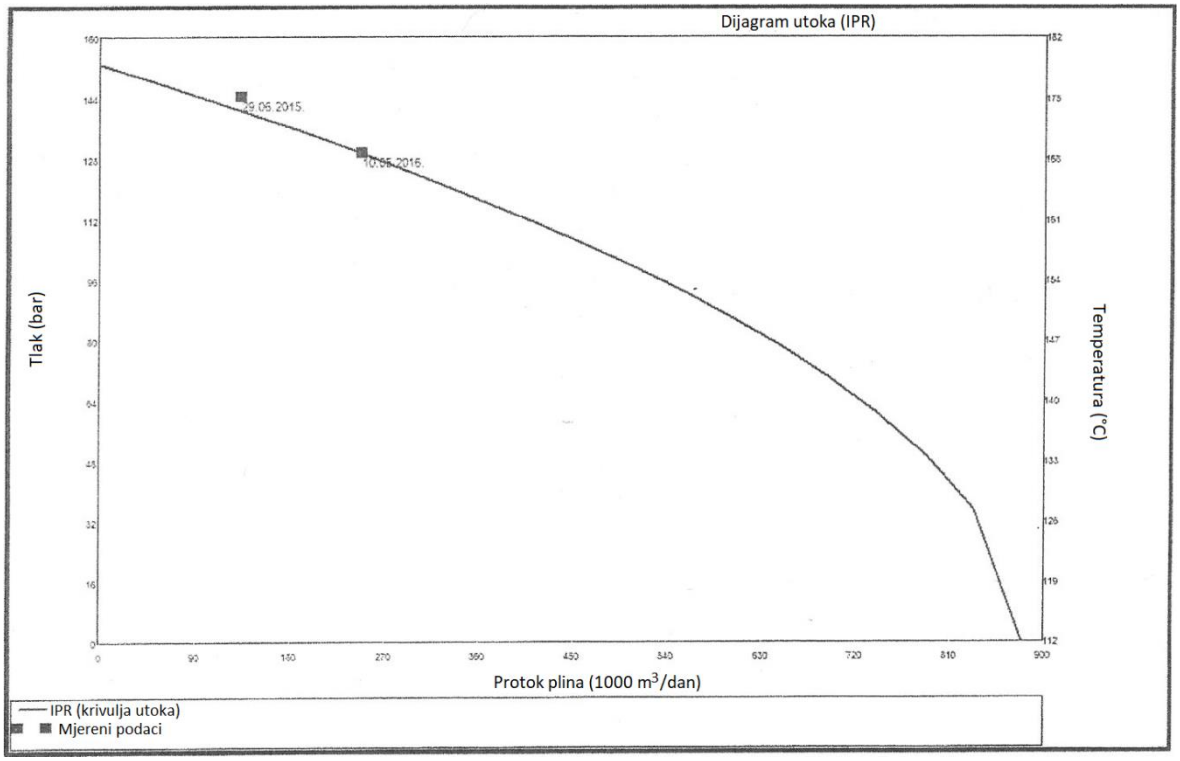
Neposredno nakon provedenog kapitalnog remonta opreme početkom travnja 2016. godine, odnosno rezanja starog proizvodnog niza na dubini iznad starog permanentnog pakera i vađenja te ugradnje nove proizvodne opreme, rezultati su bili sljedeći (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2016):

- proizvodnja plina (q_g): 157 040 m^3/dan,
- proizvodnja slojne vode (q_w): 12,8 m^3/dan,
- proizvodnja kondenzata (q_c): 60,4 m^3/dan,
- dinamički tlak na ušću bušotine (p_{wh}): 90,6 bar,
- tlak prstenastog prostora (p_a): 73,2 bar,
- dinamički tlak na dnu bušotine (p_{wf}): 120,7 bar

Nakon kapitalnog remonta sloja sredinom travnja 2016. godine, odnosno raskrivanja (napucavanja) novih gornjih intervala uz postojeće proizvodne intervale, izmjereni rezultati obavljenih radova bili su sljedeći (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2016):

- proizvodnja plina (q_g): 247 880 m^3/dan,
- proizvodnja slojne vode (q_w): 21,7 m^3/dan,
- proizvodnja kondenzata (q_c): 90,0 m^3/dan,
- dinamički tlak na ušću bušotine (p_{wh}): 78,0 bar,
- tlak prstenastog prostora (p_a): 66,8 bar,
- dinamički tlak na dnu bušotine (p_{wf}): 129,6 bar.

Stvarna radna točka, odnosno presjecište IPR i VLP krivulje, prije i nakon izvedenih radova prikazana je na slici 4-15. gdje se može uočiti da se radne točke proizvodnog sustava bušotine X-1 prije i nakon izvedenih radova nalaze praktički na istoj IPR krivulji, što je pokazatelj neuspješnog pokušaja povećanja proizvodnosti (poboljšanja IPR krivulje) perforiranjem gornjih intervala, te kako bušotina X-1 nakon remontnih radova radi s povećanom depresijom.



Slika 4-15. Radna točka proizvodnog sustava bušotine X-1 prije i nakon remontnih radova 2016. godine (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2016)

U svibnju 2016. godine provedeno je mjerenje dinamičkog gradijenta tlaka čijom je analizom utvrđeno kako se povećanje proizvodnje bušotine X-1 postiglo primarno povećanjem depresije na sloj, a tek neznatno povećanjem produktivnosti bušotine što ukazuje na oštećenje pribušotinske zone (*skin*). Tijekom mjerenja dinamičkog gradijenta utvrđena je i prohodnost bušotine do dubine od 3390 m kalibrom 38 mm (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2016).

4.4. PROIZVODNJA I STANJE BUŠOTINE X-1 NAKON REMONTNIH RADOVA 2016. GODINE

U ovome su poglavlju opisani remontni radovi, odnosno perforiranje gornjih intervala i reperforiranja postojećih proizvodnih intervala uz kiselinske obrade ležišta, provedeni tijekom 2016. i 2017. godine s ciljem smanjenja oštećenja pribušotinske zone i povećanja proizvodnih količina, odnosno ublažavanja prirodnog pada proizvodnje bušotine X-1.

4.4.1. Perforiranje gornjeg intervala i kiselinska obrada sloja

Nakon provedenih remontnih radova od sredine ožujka do sredine travnja 2016. godine i kratkotrajnog povećanja proizvodnje, došlo je do trenda pada proizvodnih količina. Proizvodni parametri bušotine X-1 prije radova bili su sljedeći (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2016):

- proizvodnja plina (q_g): 142 400 m^3/dan,
- proizvodnja kondenzata (q_c): 31 m^3/dan,
- omjer proizvedene slojne vode i plina (WGR): 105 cm^3/m^3,
- dinamički tlak na ušću bušotine (p_{wh}): 79 bar.

Uzimajući u obzir rezultate DST-a iz lipnja 1989. godine, radne točke proizvodnog sustava prije i nakon KRS-a i KRO-a te rezultate izvršenih karotažnih mjerenja, čiji je dijagram prikazan na slici 4-16., odlučeno je provesti perforiranje, odnosno raskrivanje novih gornjih intervala sloja od 3305,0 m do 3297,0 m (debljine 8,0 m) kroz postojeću proizvodnu opremu perforatorom na kablu istih karakteristika kao i u tablici 4-14. uz gustoću od 20 perforacija po metru. Prosječne početne vrijednosti ležišnih parametara navedenog intervala bile su sljedeće (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2016):

- očekivani slojni fluid: plin,
- poroznost (Φ): 4%,
- zasićenje slojnom vodom (S_w): 43%,
- efektivna debljina ležišta (h_{ef}): 1,3 m;

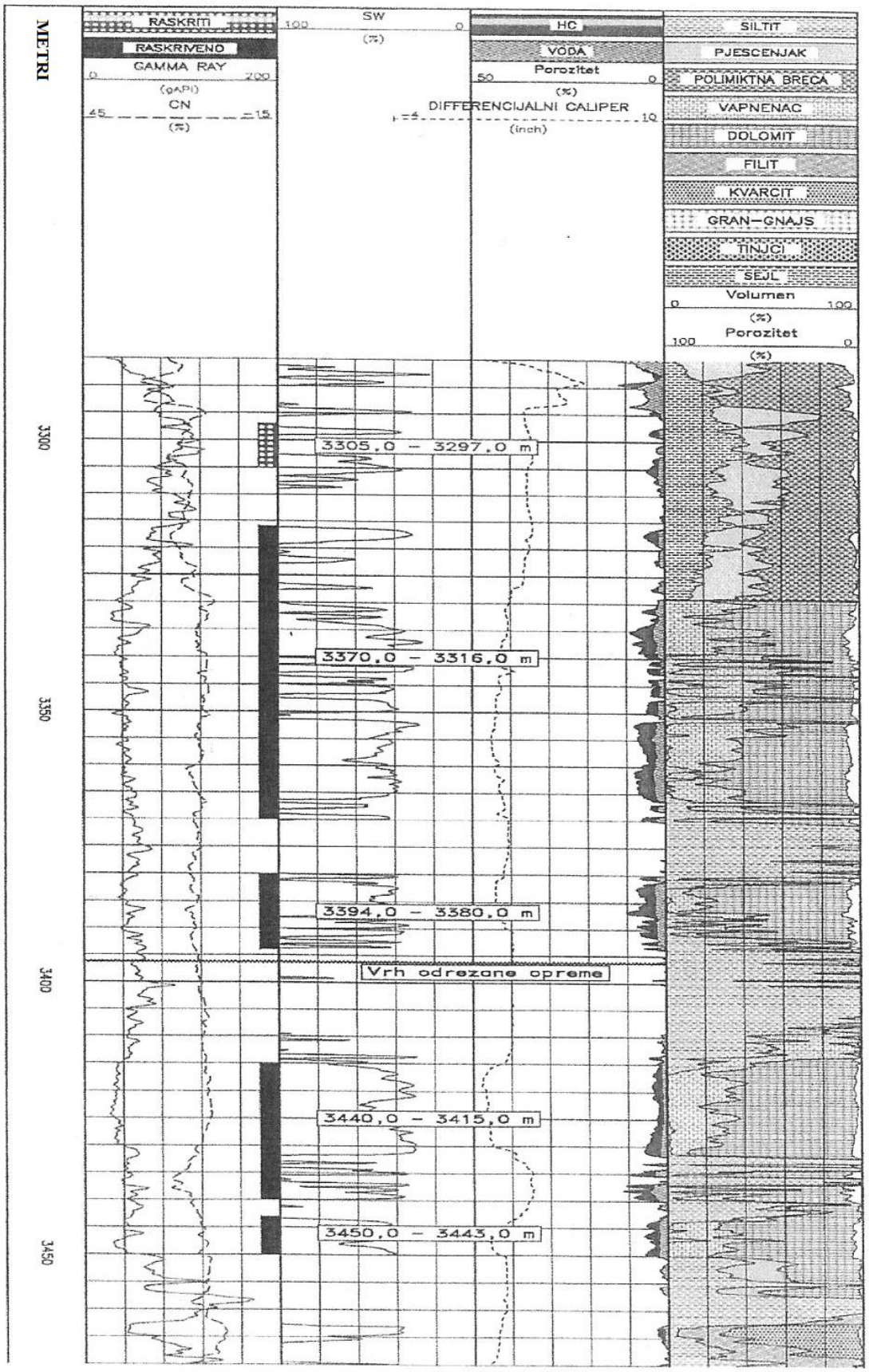
pri čemu su granične vrijednosti za određivanje efektivne debljine ležišta (*engl. Net Pay*) iznosile:

- zasićenje slojnom vodom (S_w): < 50% i
- poroznost ležišta (Φ): > 2,5%.

Nakon perforiranja, izvršena je kemijska (kiselinska) obrada sloja s 15 m^3 15%-tne klorovodične kiseline (HCl) te je nakon toga provedeno hidrodinamičko mjerenje (HDM).

Rezultati izvedenih remontnih radova bili su sljedeći (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2016):

- proizvodnja plina (q_g): 238 300 m^3/dan,
- proizvodnja kondenzata (q_c): 66 m^3/dan,
- omjer pridobivene vode i plina (WGR): 88 cm^3/m^3,
- dinamički tlak na ušću bušotine (p_{wh}): 69 bar.



Slika 4-16. Dijagram karotažnih mjerenja bušotine X-1 na intervalu 3470 - 3285 m (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2016)

4.4.2. Kiselinsko pranje perforacija i kiselinska obrada sloja u kolovozu 2016.

Nakon kiselinskog pranja perforacija i čišćenja bušotine, izvršena je kiselinska obrada sloja. Savitljivi tubing bio je spušten do 3370 m te je, uz dodavanje dušika, utisnuto 1,5 m^3 15%-tne klorovodične kiseline (HCl) s dodacima (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2016). Bušotina je na kraju puštena u sabirni sustav. Proizvodnja bušotine X-1 prije i nakon provedenih radova prikazana je u tablici 4-15. gdje se vidi povećanje proizvodnje plina za 45 100 m^3/dan i kondenzata za 16 m^3/dan uz povećanje tlaka na ušću bušotine od 9 bar.

Tablica 4-15. Prikaz rezultata rudarskih radova u kolovozu 2016 (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2016)

	Proizvodne količine, m^3/dan			Dinamički tlak na ušću bušotine, bar
	Plin	Slojna voda	Kondenzat	
Prije radova	217 400	21	67	66
Poslije radova	262 500	20	83	75

4.4.3. Kiselinska obrada sloja i reperforiranje tijekom 2017. godine

U 2017. godini nastavljen je trend pada proizvodnih količina te je u travnju izvedena još jedna kiselinska obrada sloja kojom je ostvareno povećanje proizvodnje plina od 7100 m^3/dan i kondenzata od 5 m^3/dan što se vidi iz rezultata radova prikazanim u tablici 4-16.

Tablica 4-16. Prikaz rezultata kiselinske obrade sloja u travnju 2017. godine (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2017)

	Proizvodne količine, m^3/dan			Dinamički tlak na ušću bušotine, bar
	Plin	Slojna voda	Kondenzat	
Prije radova	183 800	25	60	63
Poslije radova	190 900	26	65	65

Bitan parametar utjecaja načina opremanja na IPR krivulju, odnosno proizvodnost bušotine, jest ukupan broj perforacija te se utjecaj na proizvodni kapacitet sustava i optimalni broj perforacija također određuje pomoću čvorišne analize na temelju jednadžbe 4-7:

$$p_{wf} = p_R - \Delta p_R - \Delta p_{perf} \tag{4-7}$$

gdje je:

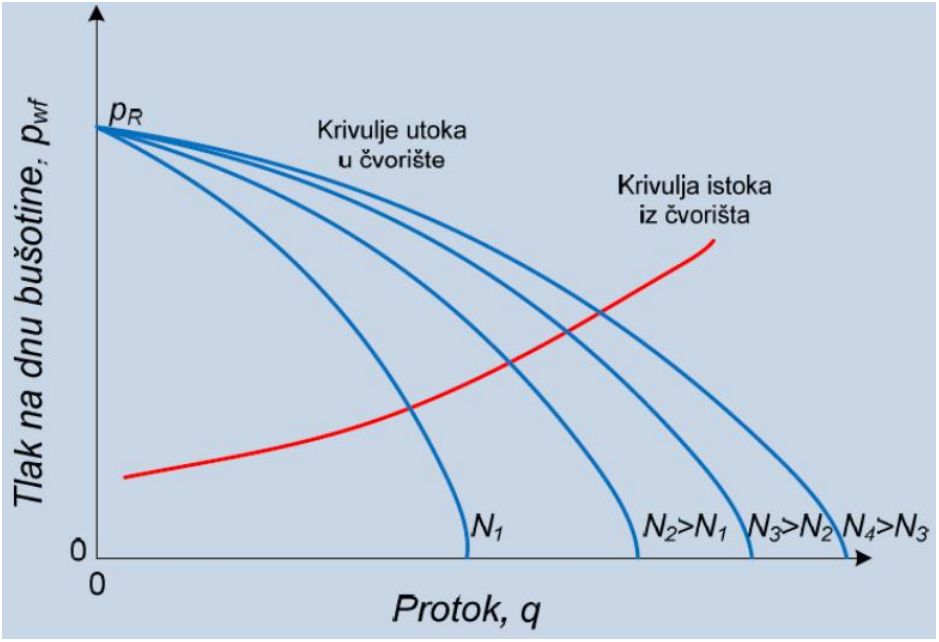
p_{wf} - dinamički tlak na dnu bušotine, bar

p_R - ležišni tlak, bar

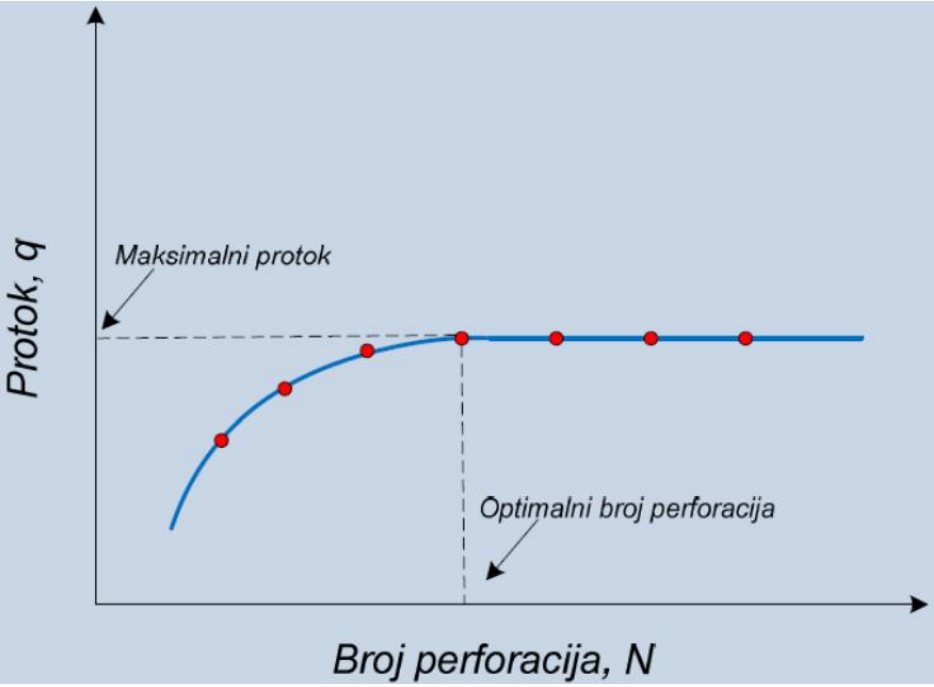
Δp_R - pad tlaka pri protjecanju kroz ležište, bar

Δp_{perf} - pad tlaka u perforacijama, bar.

Gubitak tlaka u perforacijama funkcija je ukupnog broja perforacija i protoka pa za svaki broj perforacija postoji zasebna IPR krivulja (slika 4-17.). Povećanjem broja perforacija (N) može se doći do točke gdje je pad tlaka u perforacijama zanemariv zbog čega daljnje povećavanje više nije potrebno jer nema utjecaja na protok, odnosno proizvodnost te se tako i određuje optimalan broj perforacija kako je prikazano na slici 4-18. (Čikeš, 2015).



Slika 4-17. Utjecaj broja (gustoće) perforacija na IPR krivulju (Čikeš, 2015)



Slika 4-18. Određivanje optimalnog broja perforacija (Čikeš, 2015)

U kolovozu 2017. godine izvedeno je dvostruko reperforiranje sljedećih postojećih raskrivenih proizvodnih intervala: 3370,0 – 3352,0 m (18,0 m) i 3346,0 – 3340,0 m (6,0 m) perforatorom 2,030" (51,562 mm) *BGS Streep* (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2017). Prikaz rezultata reperforiranja postojećih intervala u kolovozu 2017. godine dan je u tablici 4-17. gdje se vidi povećanje proizvodnje plina za 23 400 m^3/dan i smanjenje proizvodnje slojne vode za 6 m^3/dan, dok se proizvodnja kondenzata nije promijenila.

Tablica 4-17. Prikaz rezultata dvostrukog reperforiranja postojećih proizvodnih intervala u kolovozu 2017. godine (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2017)

	Proizvodne količine, m^3/dan			Dinamički tlak na ušću bušotine, bar
	Plin	Slojna voda	Kondenzat	
Prije radova	121 500	49	44	58
Poslije radova	144 900	43	44	60

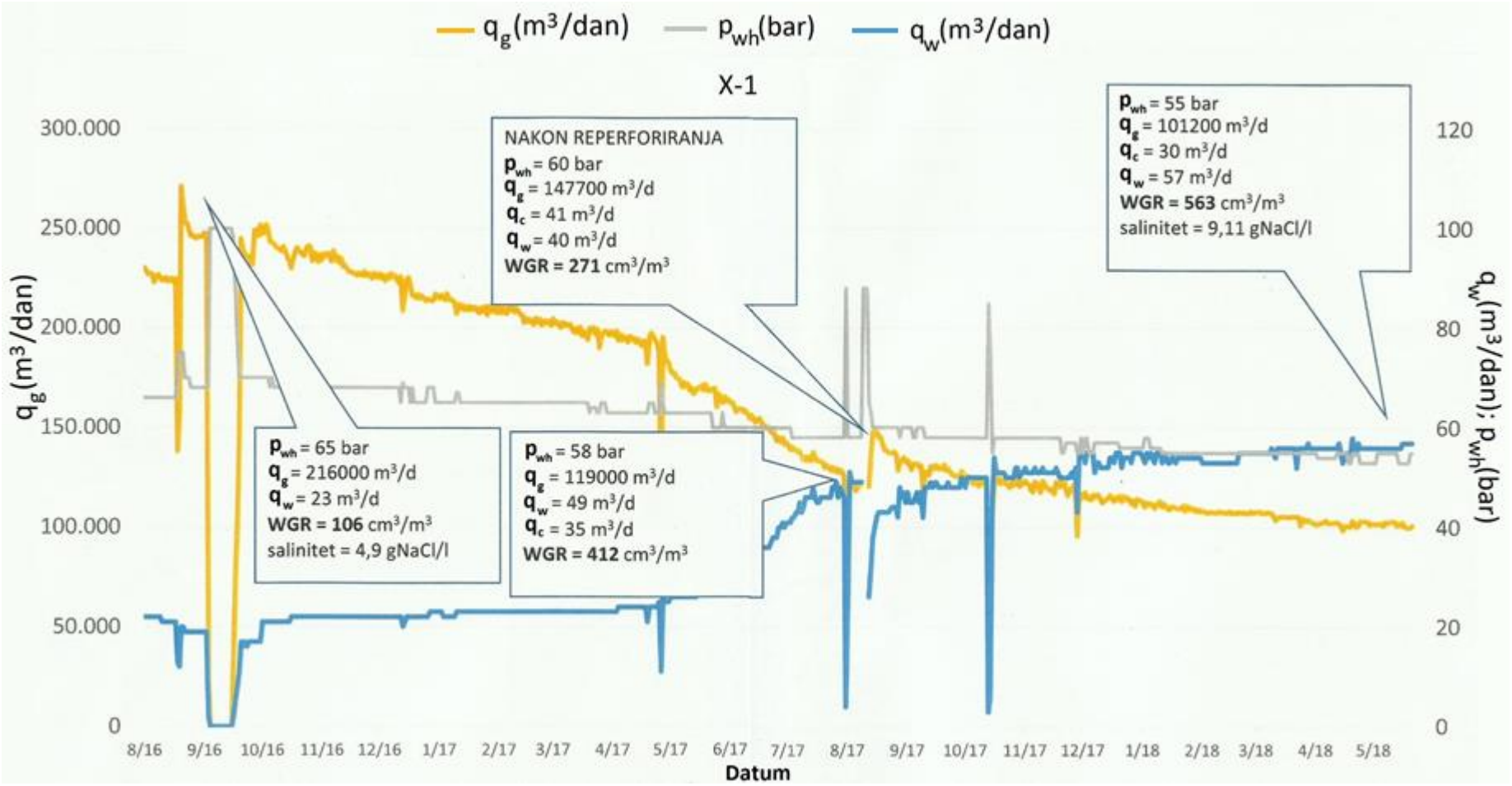
Sredinom listopada 2017. godine provedeno je reperforiranje intervala 3385,0 – 3382,0 m (3,0 m) perforatorom 2" (50,8 mm) na kablu. Tijekom radova je došlo do prihvata, odnosno zapinjanja perforatora u kratkom tubingu promjera $2^7/_8$" (73,025 mm), prijelazu za odlaganje „X" i pakeru te je, nakon pokušaja vađenja, oprema za perforiranje otpala i ostala na dnu bušotine (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2017). U tablici 4-18. dan je prikaz

rezultata reperforiranja prema kojoj je vidljivo slabo povećanje proizvodnje plina od 1300 m^3/dan i kondenzata od 2 m^3/dan uz povećanje proizvodnje slojne vode za 4 m^3/dan.

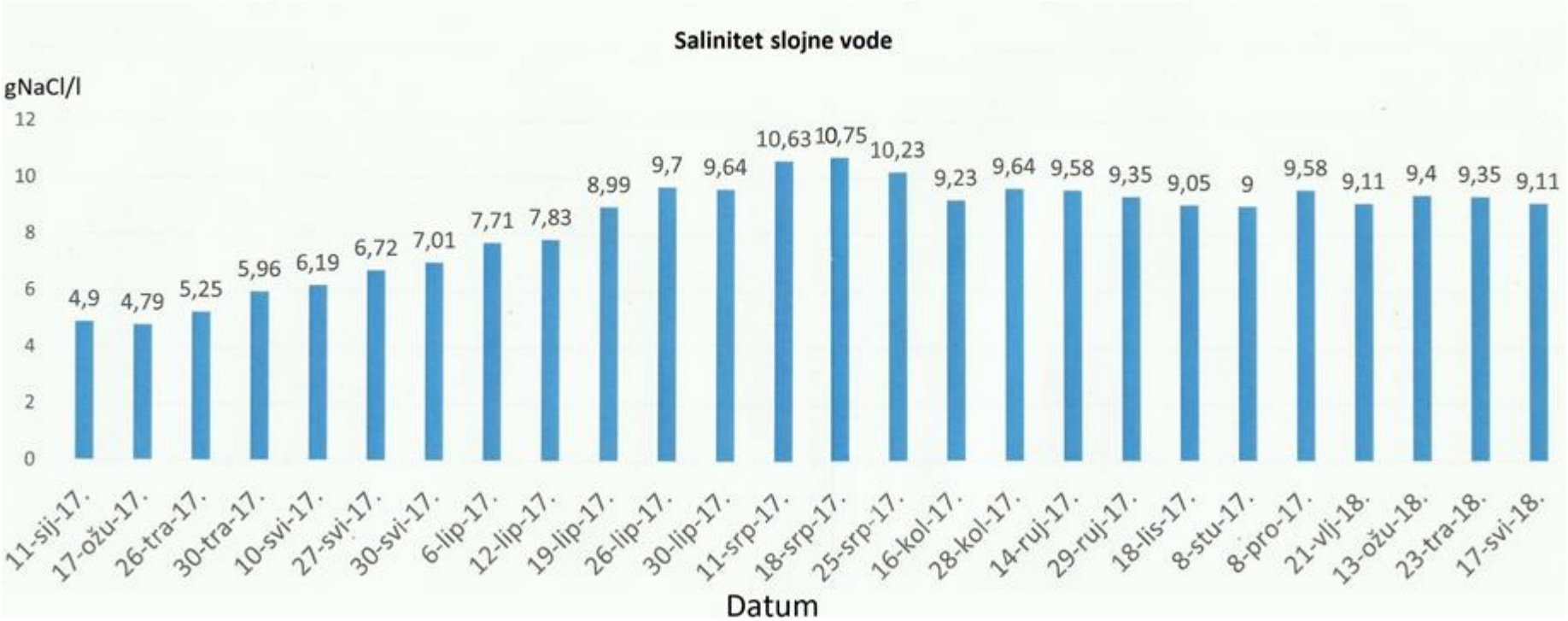
Tablica 4-18. Prikaz rezultata repreforiranja postojećeg proizvodnog intervala u listopadu 2017. godine (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2017)

	Proizvodne količine, m^3/dan			Dinamički tlak na ušću bušotine, bar
	Plin	Slojna voda	Kondenzat	
Prije radova	121 300	50	41	58
Poslije radova	122 600	54	43	58

Na slici 4-19. prikazan je trend kretanja proizvodnje plina i slojne vode od kolovoza 2016. godine do svibnja 2018. godine, dok je na slici 4-20. prikazan trend kretanja saliniteta slojne vode od početka 2017. godine do kraja svibnja 2018. godine.



Slika 4-19. Trend kretanja proizvodnje plina i slojne vode bušotine X-1 od kolovoza 2016. do svibnja 2018. godine (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2018)



Slika 4-20. Trend kretanja saliniteta slojne vode pridobivene iz bušotine X-1 od siječnja 2017. do svibnja 2018. godine (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2018)

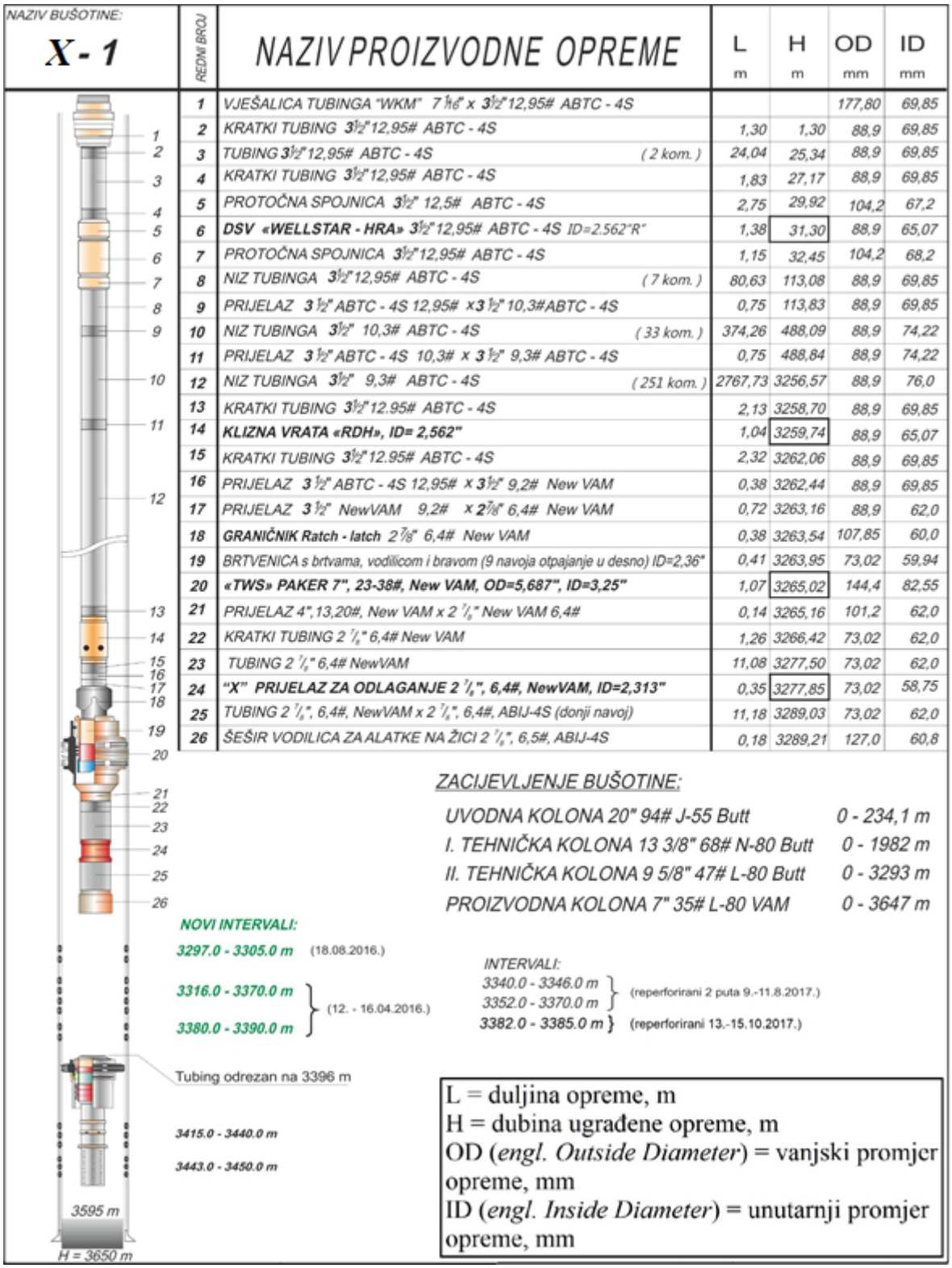
5. MODELIRANJE PROIZVODNOG SUSTAVA TE ANALIZA TRENUTNIH I BUDUĆIH PROIZVODNIH MOGUĆNOSTI BUŠOTINE X-1

U ovome je poglavlju prikazano trenutno stanje ugrađene proizvodne opreme i trenutni proizvodni parametri bušotine X-1, opisan je postupak modeliranja proizvodnog sustava u računalnom programu Prosper te je provedena analiza trenutnih i prognoza budućih proizvodnih mogućnosti pomoću analize osjetljivosti.

5.1. TRENUTNO STANJE I PROIZVODNJA BUŠOTINE X-1

Trenutno stanje ugrađene proizvodne opreme i raskrivenih proizvodnih intervala bušotine X-1 prikazano je na slici 5-1. Prema posljednjim dostupnim mjerenim podacima od kraja srpnja 2018. godine proizvodni parametri bušotine X-1 imali su sljedeće vrijednosti (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2018):

- proizvodnja plina (q_g): 89 400 m^3/dan,
- proizvodnja kondenzata (q_c): 21,01 m^3/dan,
- proizvodnja slojne vode (q_w): 55,7 m^3/dan,
- omjer proizvedene slojne vode i plina (WGR): $6{,}23 \cdot 10^{-4}$ m^3/m^3,
- omjer proizvedenog kondenzata i plina (GOR): 4255,117 m^3/m^3,
- dinamički tlak na ušću bušotine (p_{wh}): 54 bar,
- dinamička temperatura na ušću bušotine (t_{wh}): 70 °C,
- dubina mjernog instrumenta: 3373,5 m,
- dinamički tlak na dnu bušotine (p_{wf}): 104 bar.



Slika 5-1. Trenutno stanje bušotine X-1: ugrađena proizvodna oprema i raskriveni proizvodni intervali (Tehnička dokumentacija INA, d.d., 2017)

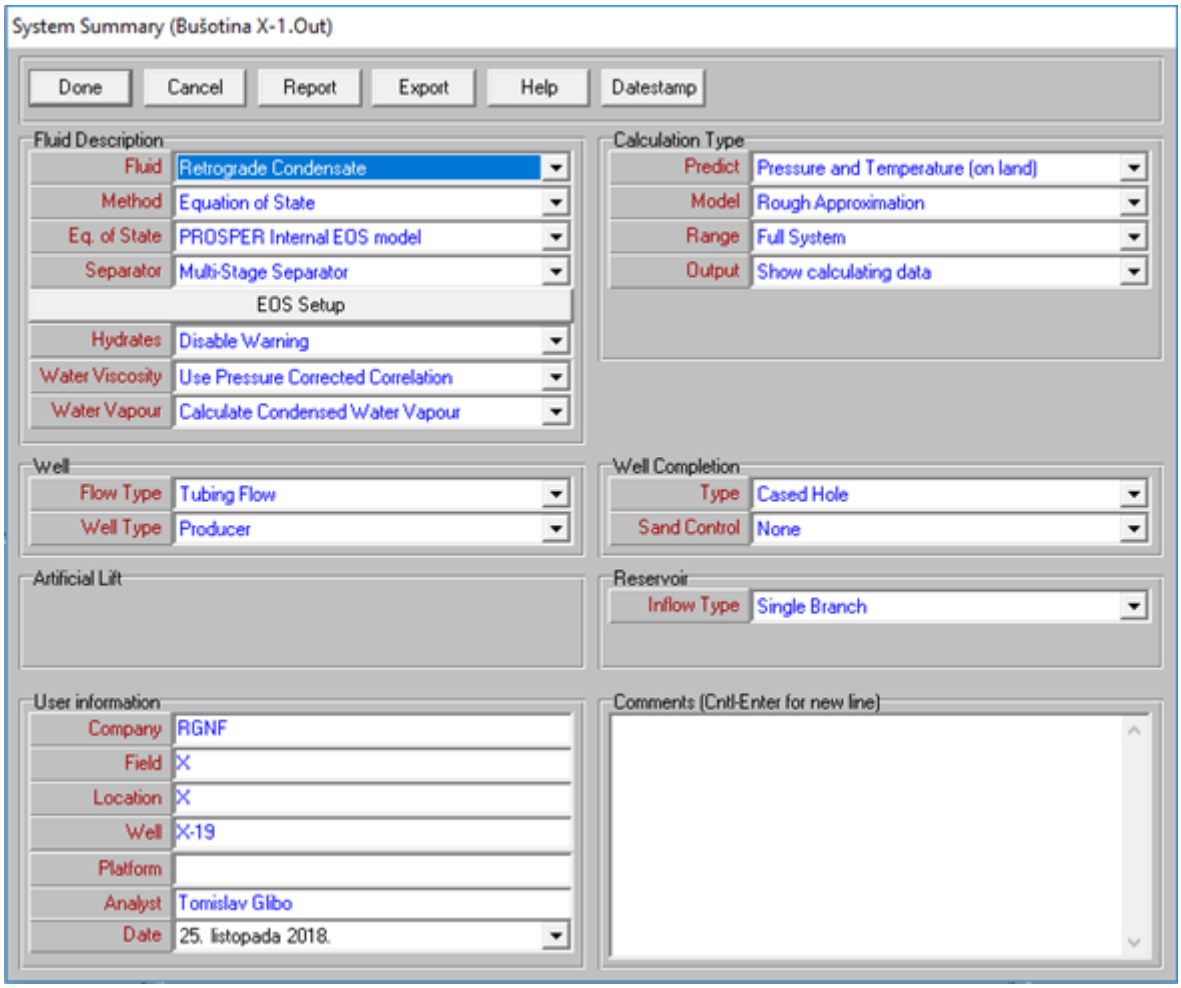
5.2. MODELIRANJE PROIZVODNOG SUSTAVA BUŠOTINE X-1 I ANALIZA TRENUTNIH PROIZVODNIH MOGUĆNOSTI

Za modeliranje proizvodnog sustava, analizu (proračun) trenutnih i prognozu budućih proizvodnih mogućnosti (analiza osjetljivosti) korišten je računalni program Prosper, koji je dio programskog paketa IPM (*engl. Integrated Production Modelling*) tvrtke Petroleum Experts, Ltd. Tijek rada u programu Prosper može se podijeliti na 6 najvažnijih koraka (Petroleum Experts, 2011):

1) definiranje proizvodnog sustava bušotine,
2) postavljanje (proračun) PVT (*engl. Pressure - Volume - Temperature*) modela (modela svojstava ležišnog fluida) te njegovo podešavanje („mečiranje“) s mjerenim podacima,
3) postavljanje IPR modela (modela utoka fluida iz ležišta u bušotinu), odnosno proračun IPR krivulje,
4) opis tehničkih karakteristika i konstrukcije bušotine te ugrađene opreme,
5) proračun VLP krivulje (krivulje podizanja fluida) i podešavanje modela prema unesenim podacima ispitivanja bušotina,
6) analiza osjetljivosti postavljenog modela proizvodnog sustava promjenom varijabli (prognoziranje buduće proizvodnje).

5.2.1. *Definiranje proizvodnog sustava bušotine X-1*

Prvi korak u modeliranju proizvodnog sustava je definiranje, tj. opis proizvodnog sustava bušotine i ležišnog fluida (*engl. System Summary*) što je prikazano na slici 5-2.



Slika 5-2. Definiranje proizvodnog sustava bušotine X-1.

U opisu fluida (*engl. Fluid Description*) unosi se tip fluida, a u ovom slučaju je to retrogradni kondenzat (*engl. Retrograde Condensate*) kod kojega računalni program Prosper uzima u obzir izdvajanje kondenzata u proizvodnom nizu. Za proračun PVT svojstava fluida odabran je *Compositional* model, odnosno jednadžba stanja (engl. *EOS - Equation of State*). Upozorenje na uvjete stvaranja hidrata je isključeno (*engl. Disable Warning*) jer je potreban unos tablice stvaranja hidrata koja nije dostupna. Za računanje viskoznosti slojne vode odabrana je korelacija koja u obzir uzima i utjecaj tlaka (*engl. Use Pressure Corrected Correlation*) te je odabrana opcija koja uzima u obzir kondenziranje vodene pare

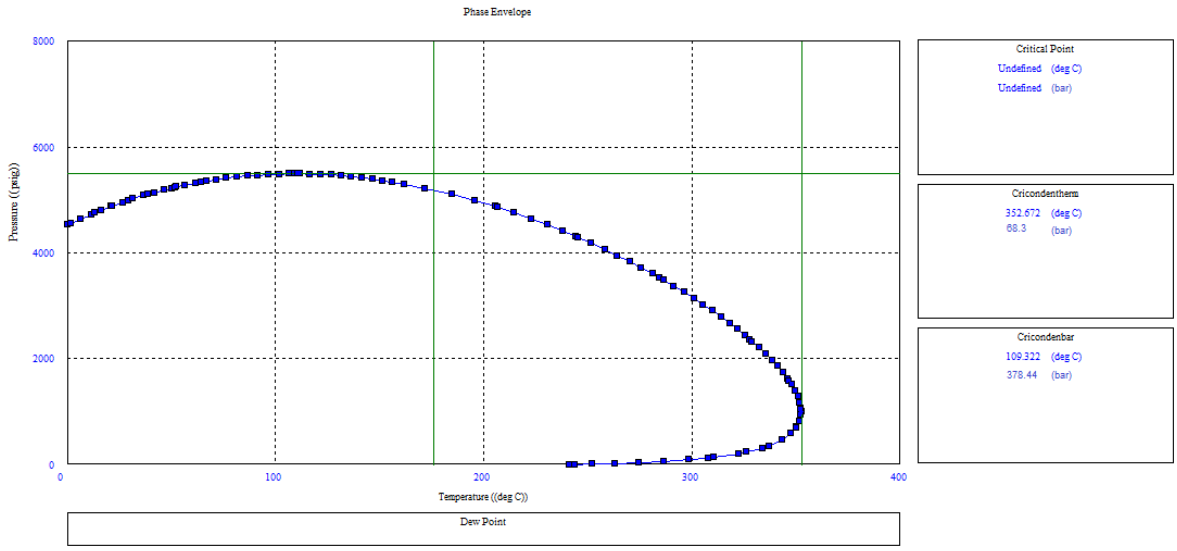
u proračunima (*engl. Calculate Condensed Water Vapour*). Kod opisa bušotine (*engl. Well*) određuje se protjecanje kroz proizvodni niz (*engl. Tubing Flow*) i da je bušotina proizvodna (*engl. Producer*). Nakon toga se definira tip, odnosno cilj proračuna, a to su temperatura i tlak na kopnu (*engl. Pressure and Temperature (on land)*), s obzirom na to da program ima različite modele proračuna tlaka i temperature za bušotinu na kopnu (*engl. onshore*) i moru (*engl. offshore*), te model proračuna temperature grubom aproksimacijom (*engl. Rough Approximation*). Na kraju se unose osnovni podaci o opremanju bušotine: bušotina je zacijevljena i nema kontrole dotoka pijeska, a proizvodnja se odvija iz jednog ležišta (*engl. Single Branch*).

5.2.2. Postavljanje PVT modela ležišnog fluida

Kao metoda proračuna PVT svojstava ležišnog fluida i predviđanja sastava i količine fluida u funkciji tlaka i temperature, odabran je *Compositional* model koji koristi jednadžbe stanja (EOS) Peng - Robinson, Soave - Redlich - Kwong ili vlastite. PVT model ležišnog fluida vrlo je bitan za kreiranje točnog modela proizvodnog sustava s obzirom na to da svojstva fluida utječu na gustoću i brzinu protjecanja, pa tako utječe na komponentu ukupnog pada tlaka. Odabrana jednadžba stanja je Peng - Robinson, a sastav fluida je uzet iz 1997. godine. Na slici 5-3. prikazan je sastav ležišnog fluida izračunat iz jednadžbe stanja, a na slici 5-4. njegov fazni dijagram (*engl. Phase Envelope*).

	Name	Mole Percent	Critical Temp.	Critical Pressure	Critical Volume	Acentric Factor	Molecular Weight	Specific Gravity	Boiling Point	Volume Shift
		(percent)	(deg C)	(BARg)	(m3/kg.mole)			(sp. gravity)	(deg C)	
1	N2	1.03162	-147.28	32.9105	0.0898	0.039	28.01	1.026	-195.75	-0.154
2	CO2	10.5924	30.94	72.9645	0.0939	0.239	44.01	1.101	-78.45	-0.1002
3	C1	73.1545	-70.1517	37.8776	0.0992	0.011	16.04	0.415	-161.55	-0.154
4	C2	7.27844	39.5144	27.7724	0.1483	0.099	30.1	0.546	-88.55	-0.1002
5	C3	2.27361	161.341	23.7397	0.203	0.153	44.1	0.585	-42.05	-0.08501
6	IC4	0.55469	179.75	30.4009	0.263	0.183	58.1	0.6	-11.75	-0.07935
7	NC4	0.60875	192.026	31.133	0.255	0.199	58.1	0.6	-0.45	-0.06413
8	IC5	0.26041	258.702	34.2252	0.306	0.227	72.2	0.621	27.85	-0.0435
9	NC5	0.22193	255.327	34.5739	0.304	0.251	72.2	0.63	36.05	-0.04183
10	C6	0.55768	263.8	31.2568	0.37	0.299	86.2	0.664	68.75	-0.01478
11	C7	0.60719	263.561	28.6282	0.432	0.349	99.5	0.688	98.45	-0.0042268
12	C8	0.46604	261.515	25.4227	0.492	0.398	112	0.703	125.65	0.018662
13	C9	0.31429	791.811	20.0493	0.548	0.445	125	0.718	150.85	0.066233
14	C10::14	1.16424	291.625	23.8911	0.69801	0.40488	146.827	0.77165	165.315	0.078873
15	C15::C35	0.91417	485.422	15.6802	1.16039	0.84437	257.392	0.8626	352.845	0.18804

Slika 5-3. Komponentni sastav ležišnog fluida dobiven proračunom iz jednadžbe stanja u programu Prosper



Slika 5-4. Fazni dijagram ležišnog fluida dobiven jednažbom stanja

5.2.3. Postavljanje IPR modela

Model za proračun IPR krivulje odabire se na temelju raspoloživih ulaznih podataka i potrebnih proračuna, odnosno željenih rezultata. Za plinsko-kondenzatne bušotine razvijena je metoda *Petroleum Experts* koja primjenjuje funkciju pseudotlaka pri višefaznom protjecanju za modeliranje smanjenja proizvodnosti bušotine kao posljedice povećanja zasićenja kapljevitom fazom (kondenzatom) u bušotini. Model istovremeno pretpostavlja da nema nakupljanja kondenzata u pribušotinskoj zoni (*engl. condensate blanking*). Važan dio IPR modela čini modeliranje *skin* faktora i to na način da program Prosper određuje pad tlaka zbog *skina* i udjele pojedinih komponenti *skina* u ukupnom *skinu* (Petroleum Experts, 2011). Na slici 5-5. prikazani su općeniti ulazni podaci potrebni za proračun IPR krivulje:

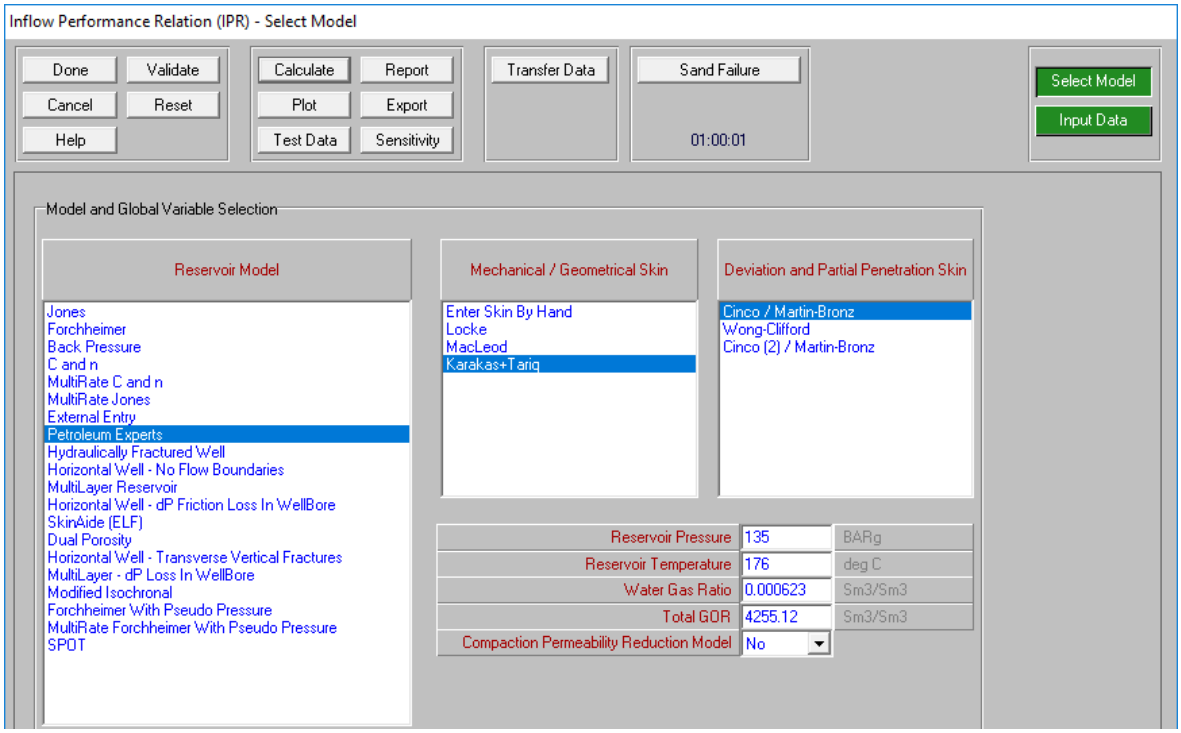
- ležišni tlak: 135 bar,
- ležišna temperatura: 176 °C,
- omjer vode i plina: 623 cm^3/m^3,
- omjer plina i kondenzata: 4255,12 m^3/m^3.

Vrijednost ležišnog tlaka je pretpostavljena s obzirom na to da se u Tehničkoj dokumentaciji INA-e, d.d. (2016) navodi da ležišni tlak pada za oko 10 bar godišnje, a 2016. je iznosio oko 153 bar. Ulazni podaci potrebni za model *Petroleum Experts,* prikazani na slici 5-6., su sljedeći:

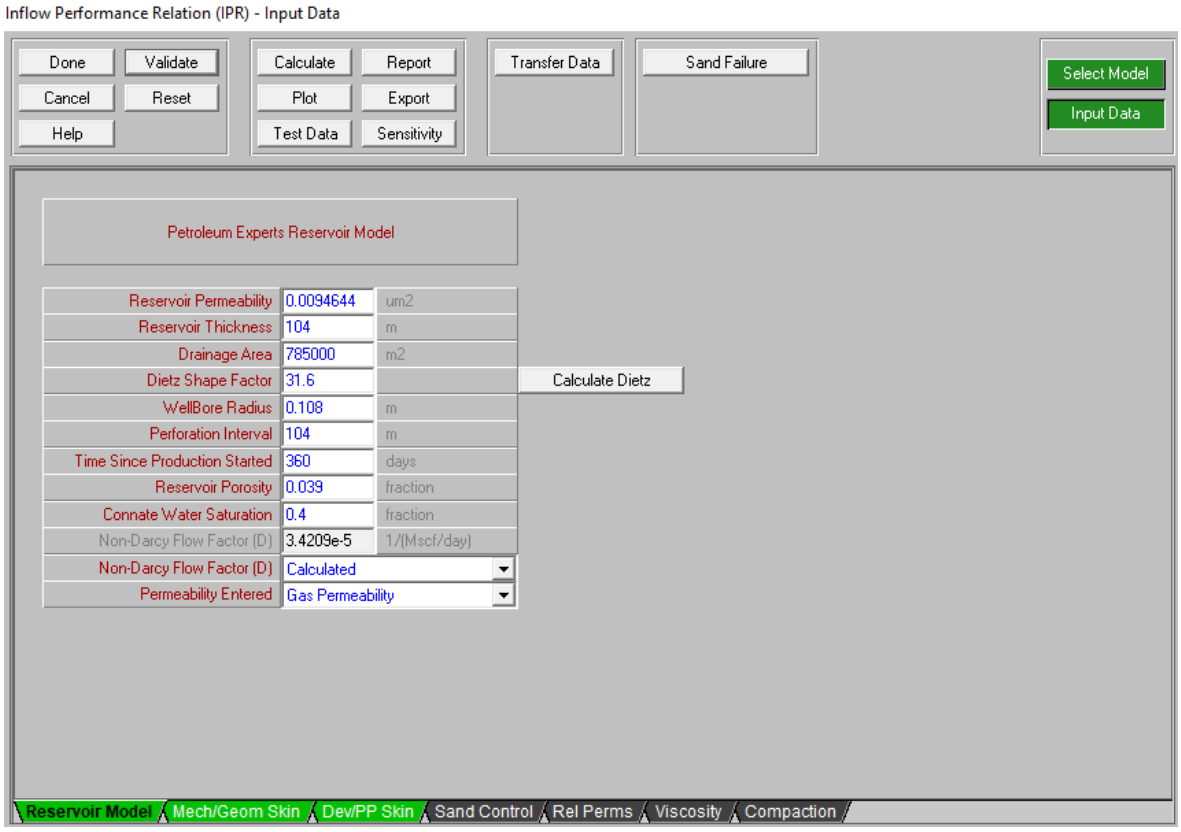
- efektivna propusnost ležišta za plin: $9{,}5 \times 10^{-3}$ μm^2,
- ukupna debljina ležišta: 104 m,
- drenažna površina: 785 000 m^2,
- Dietz faktor (ovisan o obliku drenažne površine): 31,6,
- radijus kanala bušotine: 0,108 m,
- poroznost ležišta: 0,039,
- početno zasićenje slojnom vodom: 0,4.

Za modeliranje mehaničkog *skina* odabrana je metoda *Karakas-Tariq* dok je za modeliranje *skina* zbog djelomičnog raskrivanja i otklona bušotine (geometrijskog *skina*) odabrana metoda *Cinco/Martin-Bronz,* a potrebni ulazni podaci, prikazani na slici 5-7., su sljedeći:

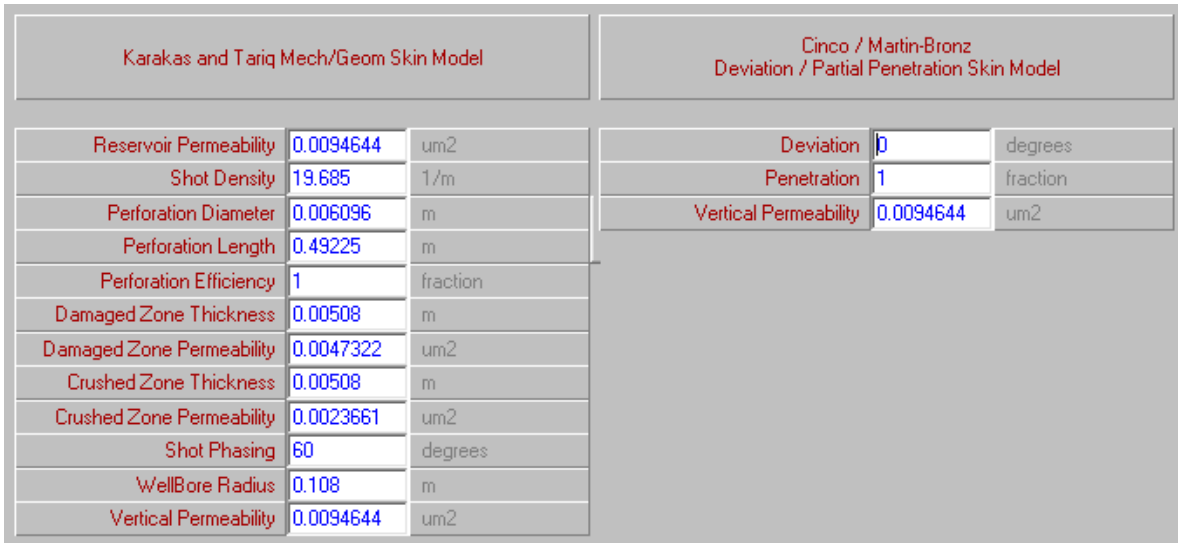
- gustoća perforacija: 20 perforacija po 1m,
- promjer otvora perforacija: 0,006096 m,
- duljina perforacije: 0,49225 m,
- učinkovitost perforiranja: 1,
- debljina zone zagađene isplakom: 0,00508 m,
- propusnost zone zagađene isplakom: 0,0047322 μm^2,
- debljina zone oštećene perforiranjem: 0,00508 m,
- propusnost zone oštećene perforiranjem: 0,0023661 μm^2,
- faza: 60°,
- vertikalna propusnost: 0,0094644 μm^2,
- otklon bušotine: 0°,
- raskrivenost ležišta: 1.



Slika 5-5. Ulazni podaci potrebni za proračun IPR krivulje

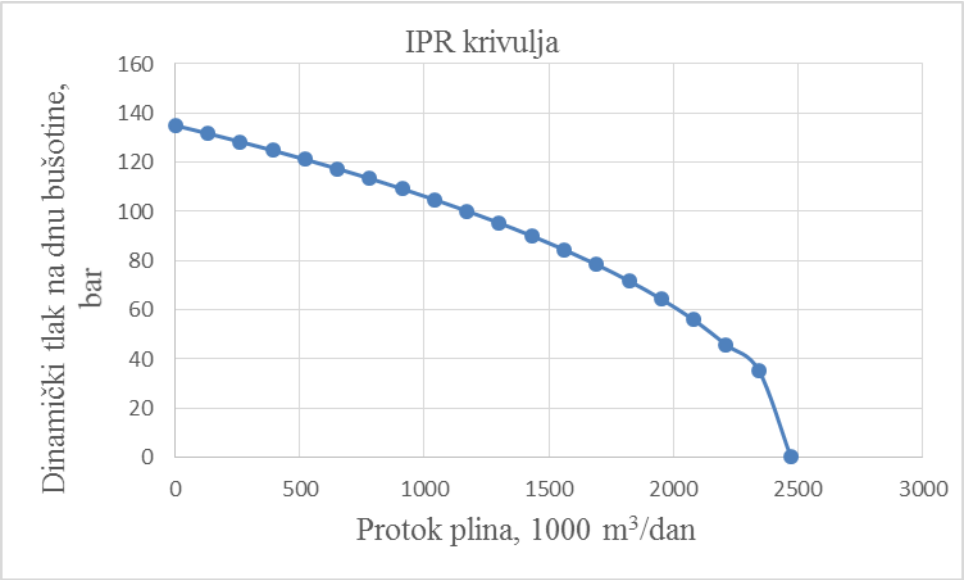


Slika 5-6. Ulazni podaci potrebni za modeliranje IPR krivulje metodom *Petroleum Experts*



Slika 5-7. Ulazni podaci potrebni za modeliranje mehaničkog i geometrijskog skina

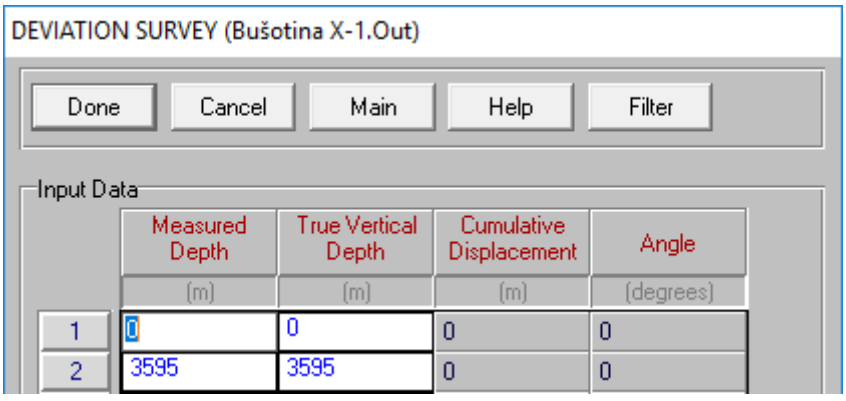
Nakon unosa svih potrebnih podataka, dobiva se IPR krivulja prikazana na slici 5-8. AOF iznosi 2 472 099 m^3/dan, a ukupni *skin* -0,81525.



Slika 5-8. IPR krivulja bušotine X-1

5.2.4. Unos tehničkih podataka o bušotini i ugrađenoj opremi

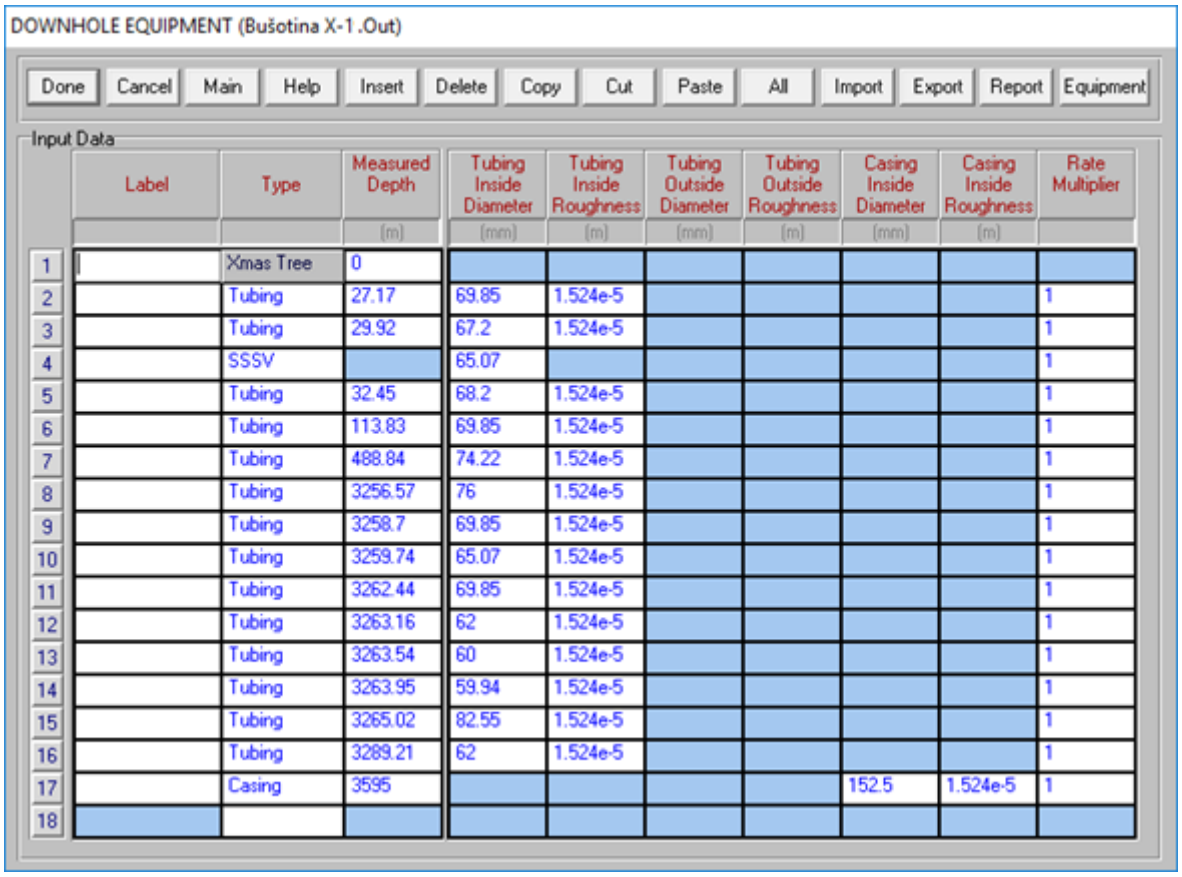
Nakon postavljenog IPR modela potrebno je definirati trajektoriju bušotine, unijeti podatke o ugrađenoj proizvodnoj opremi i podatke potrebne za proračun temperaturnog modela (geotermalni gradijent i toplinski kapaciteti fluida). Bušotina je vertikalna, pa se unosi početna (0 m) i krajnja točka, odnosno dubina bušotine (3595 m) (slika 5-9.).



Slika 5-9. Unos podataka o trajektoriji bušotine X-1

Kod unosa proizvodne opreme ponuđene su sljedeće komponente: erupcijski uređaj (*engl. xmas tree*), proizvodni niz (*engl. tubing*), dubinski sigurnosni ventil (*engl. SSSV* -

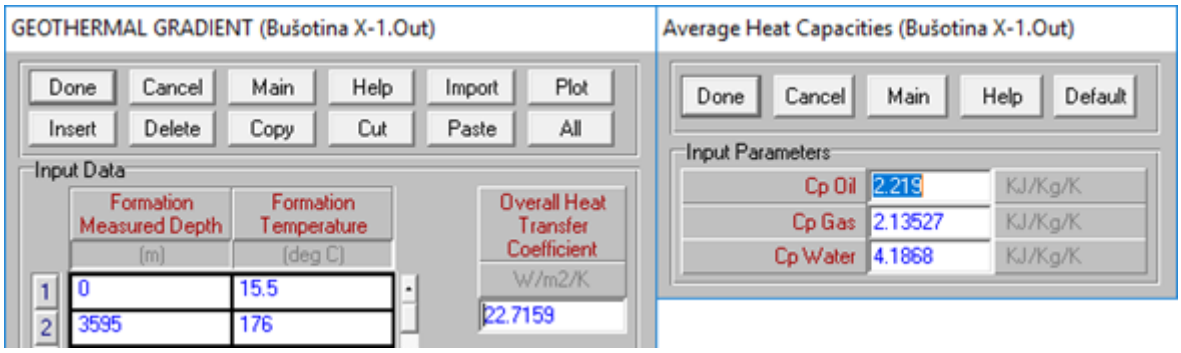
Surface-Controlled Subsurface Safety Valve), restrikcija protoka (*engl. restriction*) i proizvodna kolona zaštitnih cijevi (*engl. casing*). Oprema je unesena prema skici trenutno ugrađene proizvodne opreme prikazane na slici 5-1. uz dubinu ugradnje svake komponente i unutarnje promjere uz zadanu vrijednost hrapavosti (slika 5-10.).



	Label	Type	Measured Depth (m)	Tubing Inside Diameter (mm)	Tubing Inside Roughness (m)	Tubing Outside Diameter (mm)	Tubing Outside Roughness (m)	Casing Inside Diameter (mm)	Casing Inside Roughness (m)	Rate Multiplier
1		Xmas Tree	0							
2		Tubing	27.17	69.85	1.524e-5					1
3		Tubing	29.92	67.2	1.524e-5					1
4		SSSV		65.07						1
5		Tubing	32.45	68.2	1.524e-5					1
6		Tubing	113.83	69.85	1.524e-5					1
7		Tubing	488.84	74.22	1.524e-5					1
8		Tubing	3256.57	76	1.524e-5					1
9		Tubing	3258.7	69.85	1.524e-5					1
10		Tubing	3259.74	65.07	1.524e-5					1
11		Tubing	3262.44	69.85	1.524e-5					1
12		Tubing	3263.16	62	1.524e-5					1
13		Tubing	3263.54	60	1.524e-5					1
14		Tubing	3263.95	59.94	1.524e-5					1
15		Tubing	3265.02	82.55	1.524e-5					1
16		Tubing	3289.21	62	1.524e-5					1
17		Casing	3595					152.5	1.524e-5	1
18										

Slika 5-10. Unos podataka o ugrađenoj proizvodnoj opremi bušotine X-1

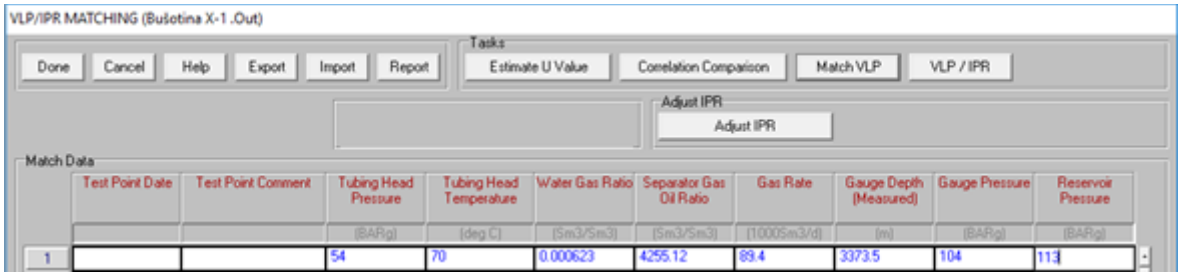
Na kraju se unosi izmjerena statička temperatura na dubini mjerenja (geotermalni gradijent formacije) potrebna za temperaturni model i ukupni koeficijent prolaska topline za kojega se unosi pretpostavljena vrijednost od 22,7159 $W/m^2/K$ (4 $BTU/h/ft^2$) za plinsko-kondenzatne bušotine) te toplinski kapaciteti proizvodnih fluida čije vrijednosti ostaju zadane programom (slika 5-11.).



Slika 5-11. Unos izmjerenog geotermalnog gradijenta i toplinskih kapaciteta fluida

5.2.5. *Proračun VLP krivulje i podešavanje prema podacima ispitivanja bušotine*

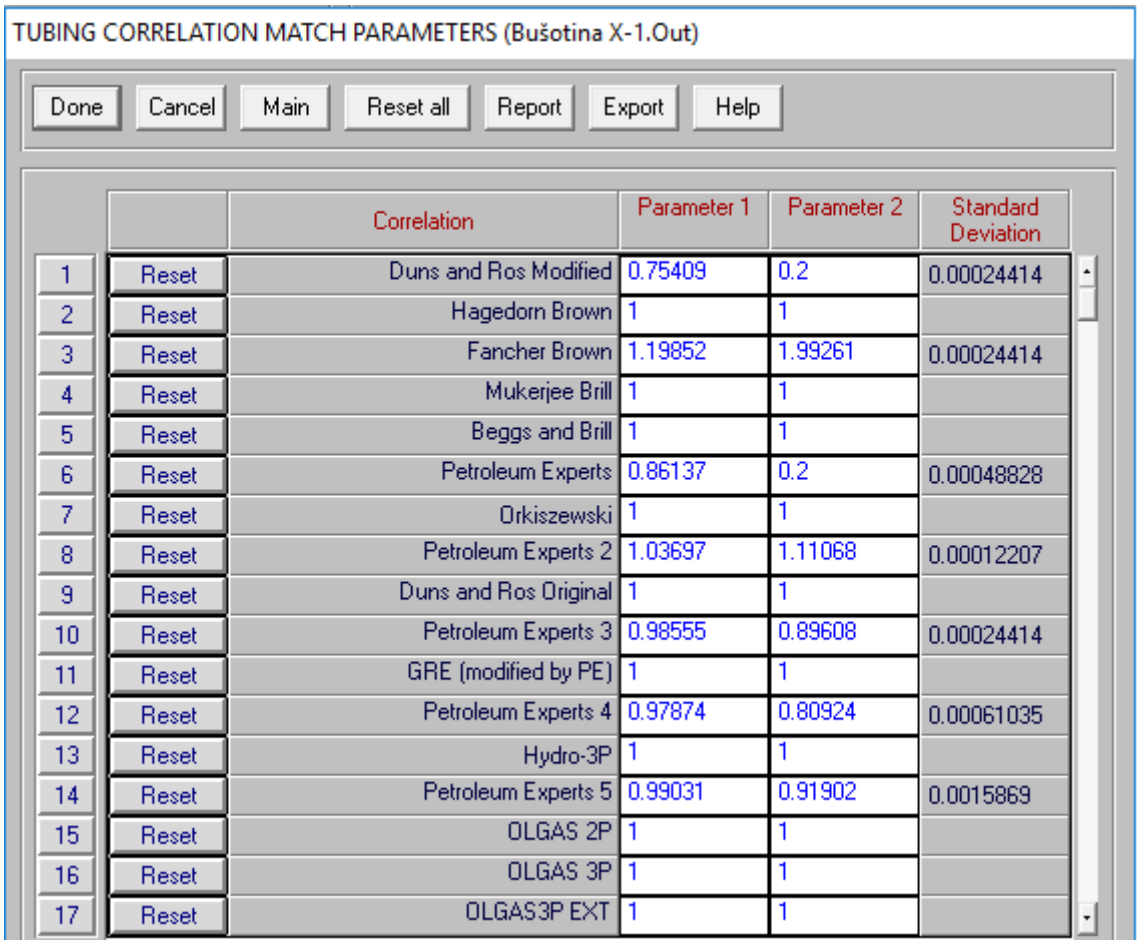
Izmjereni podaci tijekom ispitivanja bušotina (dinamički tlak i temperatura na ušću bušotine, omjer proizvedene slojne vode i plina, omjer proizvedenog plina i kondenzata, protok plina, dubina mjernog instrumenta, dinamički tlak na dnu bušotine i ležišni tlak) koriste se za podešavanje VLP krivulje izračunate nekom od korelacija. Nakon unosa podataka (slika 5-12.) potrebno je provesti sljedeće korake: usporedba korelacija za izračunavanje gradijenata dinamičkih tlakova (VLP krivulje), podešavanje („mečiranje“) VLP krivulje i podešavanje VLP i IPR krivulje kako bi dobiveni model opisivao realne ležišne i proizvodne uvjete.



Slika 5-12. Unos mjerenih podataka tijekom ispitivanja bušotine X-1

Mjereni podaci se uspoređuju s ponuđenim korelacijama za proračun gradijenata dinamičkih tlakova kod višefaznog protoka u proizvodnom nizu (*engl. correlation comparison*) te se odabire korelacija koja se najbolje poklapa s izmjerenim vrijednostima.

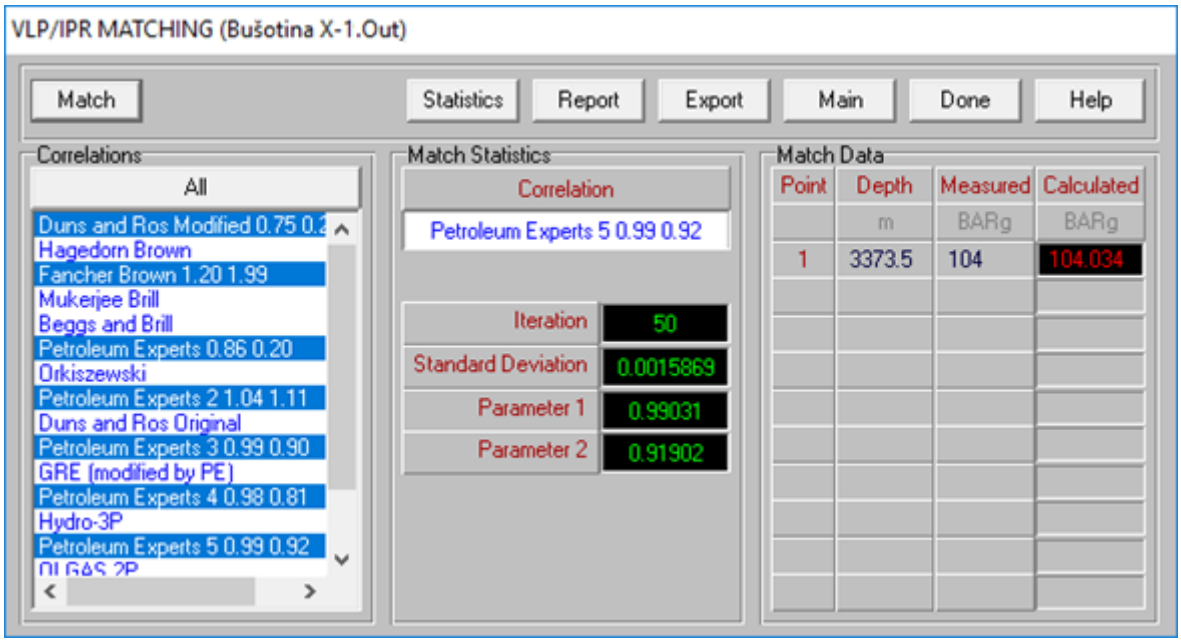
Na slici 5-13. prikazani su rezultati usporedbe korelacija *Duns and Ros Modified*, *Fancher Brown*, *Petroleum Experts*, *Petroleum Experts 2*, *Petroleum Experts 3*, *Petroleum Experts 4* i *Petroleum Experts 5*.



		Correlation	Parameter 1	Parameter 2	Standard Deviation
1	Reset	Duns and Ros Modified	0.75409	0.2	0.00024414
2	Reset	Hagedorn Brown	1	1	
3	Reset	Fancher Brown	1.19852	1.99261	0.00024414
4	Reset	Mukerjee Brill	1	1	
5	Reset	Beggs and Brill	1	1	
6	Reset	Petroleum Experts	0.86137	0.2	0.00048828
7	Reset	Orkiszewski	1	1	
8	Reset	Petroleum Experts 2	1.03697	1.11068	0.00012207
9	Reset	Duns and Ros Original	1	1	
10	Reset	Petroleum Experts 3	0.98555	0.89608	0.00024414
11	Reset	GRE (modified by PE)	1	1	
12	Reset	Petroleum Experts 4	0.97874	0.80924	0.00061035
13	Reset	Hydro-3P	1	1	
14	Reset	Petroleum Experts 5	0.99031	0.91902	0.0015869
15	Reset	OLGAS 2P	1	1	
16	Reset	OLGAS 3P	1	1	
17	Reset	OLGAS3P EXT	1	1	

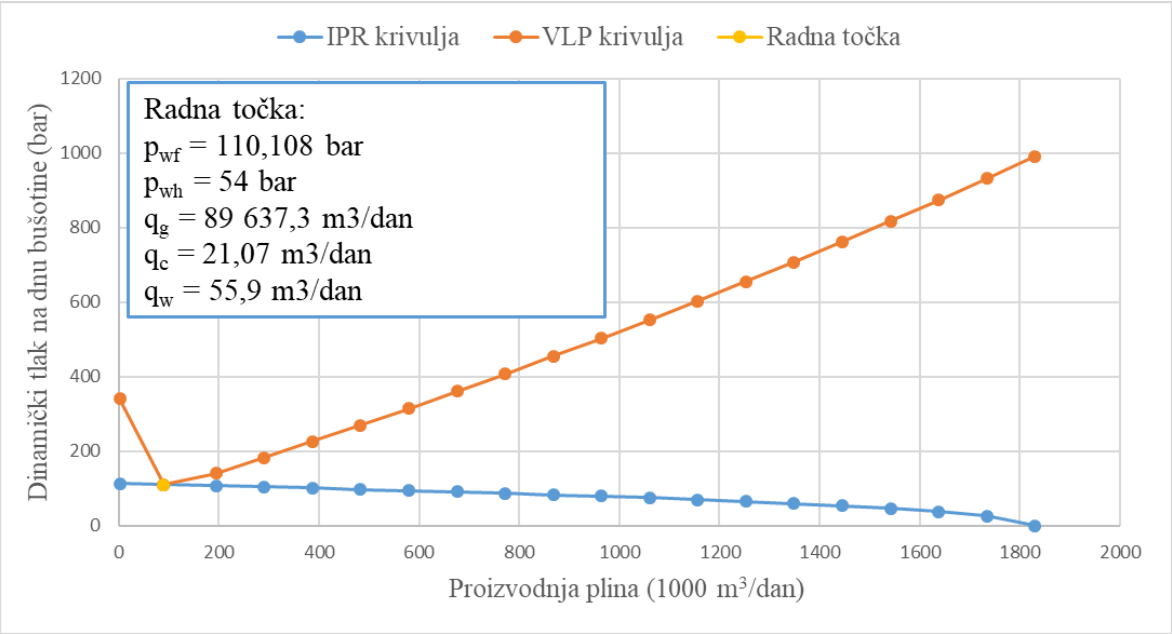
Slika 5-13. Rezultati usporedbe korelacija za proračun VLP krivulje

Da bi podešavanje (*engl. matching*) bilo što preciznije, parametar 1, koji se odnosi na hidrostatsku komponentu gradijenta tlaka, trebao bi imati vrijednost 0,9-1,1, dok se parametar 2, koji se odnosi na trenje, treba poklapati s parametrom 1 uz dopušteno odstupanje od 10%, a standardna devijacija treba težiti k nuli. Prema tome, odabrana je korelacija *Petroleum Experts* 5 za podešavanje VLP krivulje (*engl. match VLP*) gdje se pomoću metode nelinearne regresije odabrana korelacija prilagođava mjerenim podacima s ciljem postizanja što veće točnosti (slika 5-14.).



Slika 5-14. Rezultati podešavanja korelacije *Petroleum Experts 5* prema podacima mjerenja

Zadnji korak čini zajedničko podešavanje VLP i IPR krivulje (*engl. quality check*) i podešavanje IPR krivulje (*engl. adjust IPR*) prilikom čega se provjerava jesu li gradijenti tlakova dobiveni kod podešavanja VLP krivulje usklađeni s IPR krivuljom, tj. poklapaju li se izmjereni protok i tlak na dnu bušotine s izračunatim tlakom VLP i IPR krivulja. Rezultat podešavanja je nova IPR krivulja sa stvarnim ležišnim tlakom koji iznosi 112,67 bar i maksimalnim teoretskim kapacitetom (AOF) od 1 830 019 m^3/dan te trenutna radna točka sustava što je prikazano na slici 5-15. Točka mjerenja se gotovo poklapa s izračunatom radnom točkom sustava, što je pokazatelj prilično visoke točnosti modela. Odstupanje modela proizvodnog sustava bušotine od mjerenih vrijednosti tlaka na dnu bušotine i protoka prikazano je u tablici 5-1.



Slika 5-15. Trenutna radna točka proizvodnog sustava bušotine X-1

Tablica 5-1. Odstupanje postavljenog modela proizvodnog sustava bušotine od mjerenih podataka

	Izračunato (model)	Izmjereno (ispitivanje)	Odstupanje modela
Dinamički tlak na dnu bušotine (bar)	110,108	110,04	0,062%
Protok plina (m^3/dan)	89 637,3	89 400	0,265%

Ovim je koracima završen postupak modeliranja sustava proizvodnje iz bušotine koji se zbog svoje točnosti može s pouzdanošću primijeniti u analizi osjetljivosti za prognozu budućih proizvodnih mogućnosti. Sama svrha postavljanja modela i jest u pretpostavljanju budućih promjena varijabli proizvodnog sustava, odnosno parametara proizvodnje, i prognoziranja njihovog utjecaja na performanse (kapacitet) cijeloga sustava.

5.2.6. Analiza trenutnih proizvodnih mogućnosti bušotine X-1

Trenutne proizvodne mogućnosti bušotine X-1 su, uslijed prirodnog pada proizvodnje, prilično loše. Iako je ležište sposobno proizvoditi velike količine fluida i *skin* efekt je kapitalnim remontima sloja u potpunosti uklonjen, zbog sve većeg pada ležišnog tlaka i sve većeg utoka slojne vode (tablica 5-2.), posebice nakon remontnih radova 2016. godine, proizvodni kapacitet sustava prilično je mali.

Tablica 5-2. Prikaz smanjenja ležišnog tlaka i povećanja proizvodnje slojne vode u odnosu na prethodna razdoblja

	U odnosu na 2016.	U odnosu na 2009.	U odnosu na početak proizvodnje (1989.)
Pad ležišnog tlaka	26,36%	44,22%	76,38%
Povećanje proizvodnje slojne vode	156,70%	713,10%	923,90%

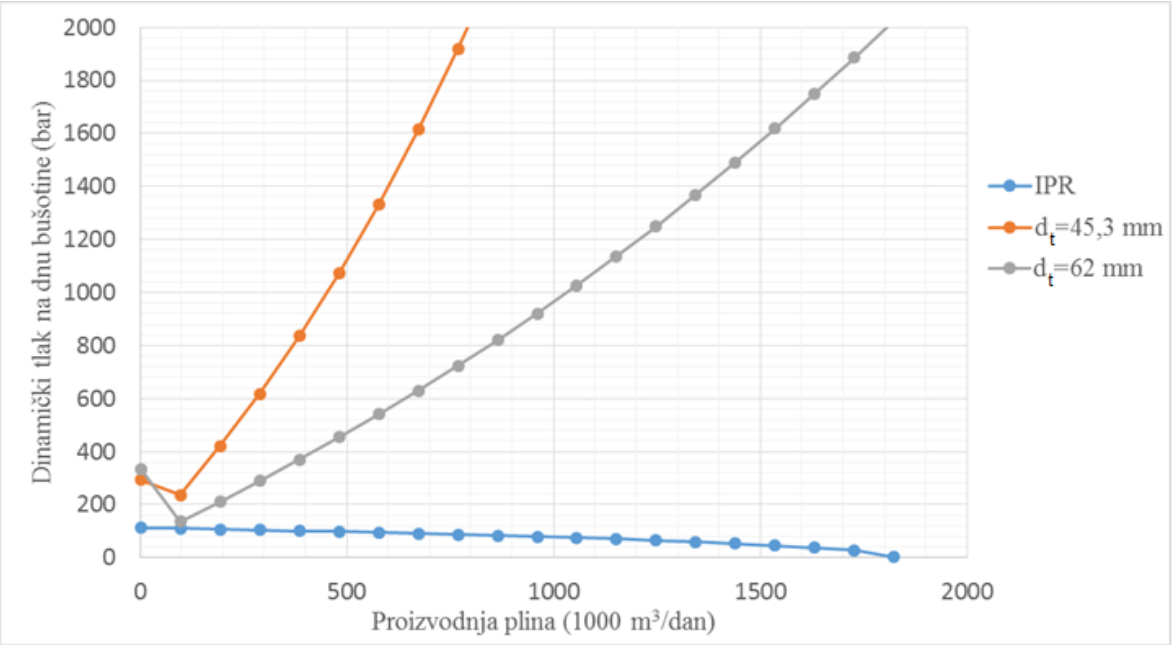
Zbog sve većeg utoka slojne vode povećan je gradijent pada tlaka, odnosno pogoršana je krivulja vertikalnog podizanja (VLP) te je struktura protjecanja čepolika što stvara velike gubitke tlaka u proizvodnom nizu - ukupno 57 bar, od čega 47,3 bar (82,98%) čini hidrostatska komponenta, odnosno gubitak tlaka uslijed gravitacije (gustoće fluida), dok 9,7 bar (17,02%) čini komponenta gubitka tlaka zbog trenja. Prema udjelima komponenti pada tlaka u ukupnom gubitku tlaka u proizvodnom nizu vidljivo je da je povećanje proizvodnje slojne vode glavni uzrok loših karakteristika istoka, odnosno VLP krivulje. Analizom u programu Prosper također je utvrđeno da zbog povećanja utoka slojne vode, a time i povećanja gustoće smjese i smanjenja brzine protjecanja ispod vrijednosti Turnerove brzine, dolazi do nakupljanja (zaostajanja) kapljevine u proizvodnom nizu (*engl. liquid loading*) te se, s obzirom na dobivene podatke, u razmatranje može uzeti i ponovna promjena unutarnjeg promjera proizvodnog niza.

5.3. ANALIZA BUDUĆIH PROIZVODNIH MOGUĆNOSTI BUŠOTINE X-1

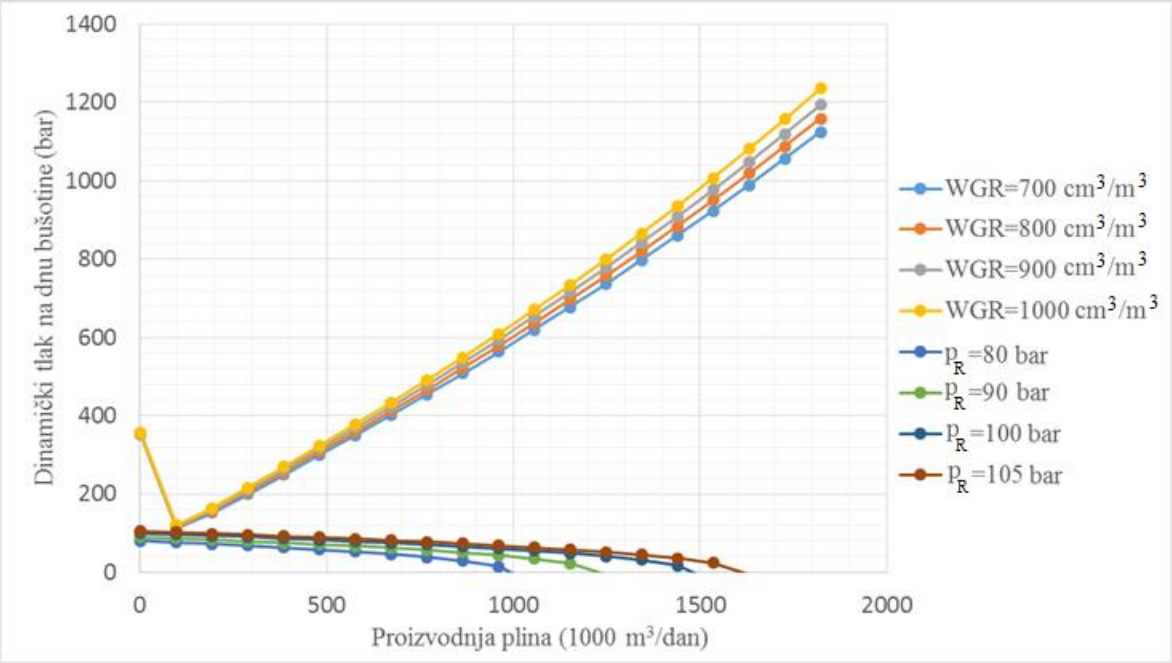
Analiza budućih proizvodnih mogućnosti bušotine provodi se pomoću analize osjetljivosti (*engl. sensitivity analysis*) proizvodnog sustava promjenom proizvodnih parametara. Iako u proizvodnom sustavu promijenjenih varijabli može biti mnogo, analiza osjetljivosti provodi se na osnovi nekoliko ključnih varijabli (ležišni tlak, omjer proizvedene slojne vode i plina, dinamički tlak na ušću bušotine i unutarnji promjer proizvodnog niza). Za svaku kombinaciju varijabli dobivaju se radne točke sustava, a cilj je pokriti što više mogućih uvjeta u bušotini u budućnosti. Ova analiza koristi se za optimalizaciju postojećeg dizajna i procjenu utjecaja budućih promjena u sustavu (Koščak Kolin et al., 2009).

U analizi osjetljivosti proizvodnog sustava bušotine X-1 prognozirao se utjecaj smanjenja ležišnog tlaka s trenutnih 112,7 bar na 105 bar, 100 bar, 90 bar, 85 bar i 80 bar i povećanja udjela slojne vode (WGR-a) s trenutnih 623 cm^3/m^3 na 700 cm^3/m^3, 800 cm^3/m^3, 900 cm^3/m^3, 950 cm^3/m^3 i 1000 cm^3/m^3 na kapacitet proizvodnog sustava uz promjenu unutarnjeg promjera proizvodnog niza s trenutnih 76 mm na 62 mm i 45,3 mm i smanjenje dinamičkog tlaka na ušću bušotine s trenutnih 65 bar na 50 bar, 40 bar, 30 bar, 20 bar, 10 bar i 5 bar. S obzirom na to da sa trenutno ugrađenim proizvodnim nizom dolazi do nakupljanja kapljevine u bušotini, analiziran je utjecaj smanjenja unutarnjeg promjera uz trenutne vrijednosti tlaka i WGR-a što je prikazano na slici 5-16. gdje je vidljivo da se IPR i VLP krivulja ne sijeku, odnosno ležišni tlak (energija) je premala za savladavanje gubitaka tlaka uslijed trenja u smanjenom proizvodnom nizu te bi u tom slučaju proizvodnja bila prekinuta.

Na slici 5-17. prikazana je analiza utjecaja smanjenja ležišnog tlaka i povećanja WGR-a uz trenutno ugrađeni proizvodni niz gdje je vidljivo da već smanjenjem ležišnog tlaka na 105 bar i povećanja WGR-a na 700 cm^3/m^3 proizvodnja staje uslijed povećanja hidrostatske komponente gradijenta tlaka, odnosno zbog nedovoljno ležišne energije za savladavanje gubitaka tlaka uslijed povećanja gustoće smjese sve većim utokom slojne vode.



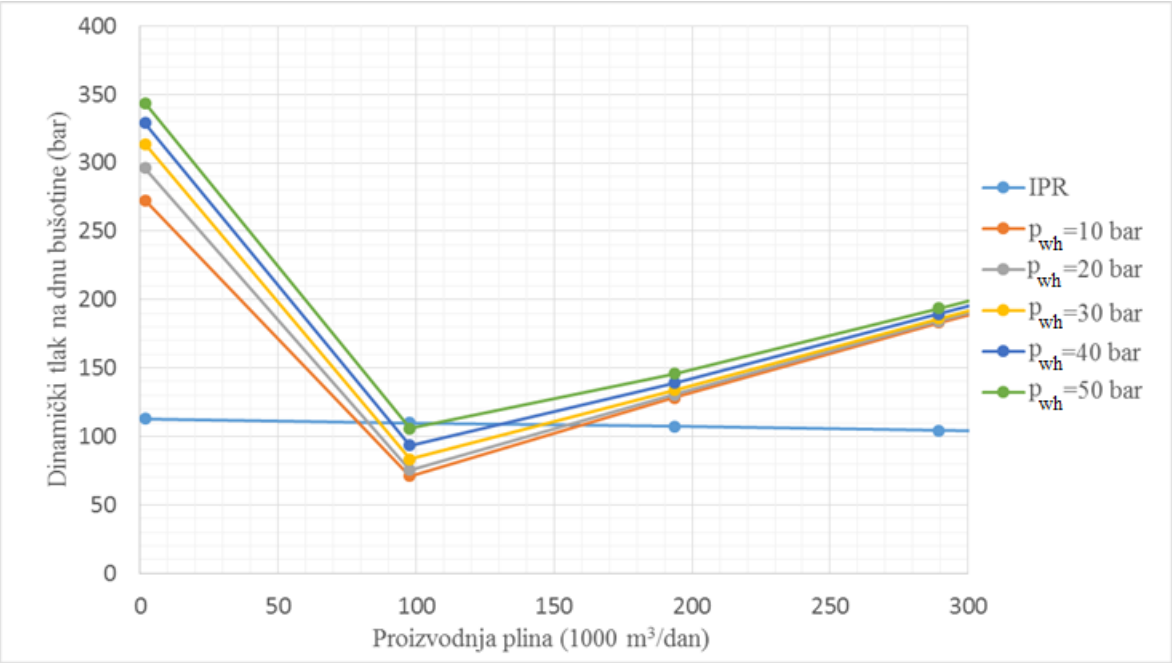
Slika 5-16. Utjecaj smanjenja unutarnjeg promjera proizvodnog niza uz trenutne uvjete ležišnog tlaka i WGR-a



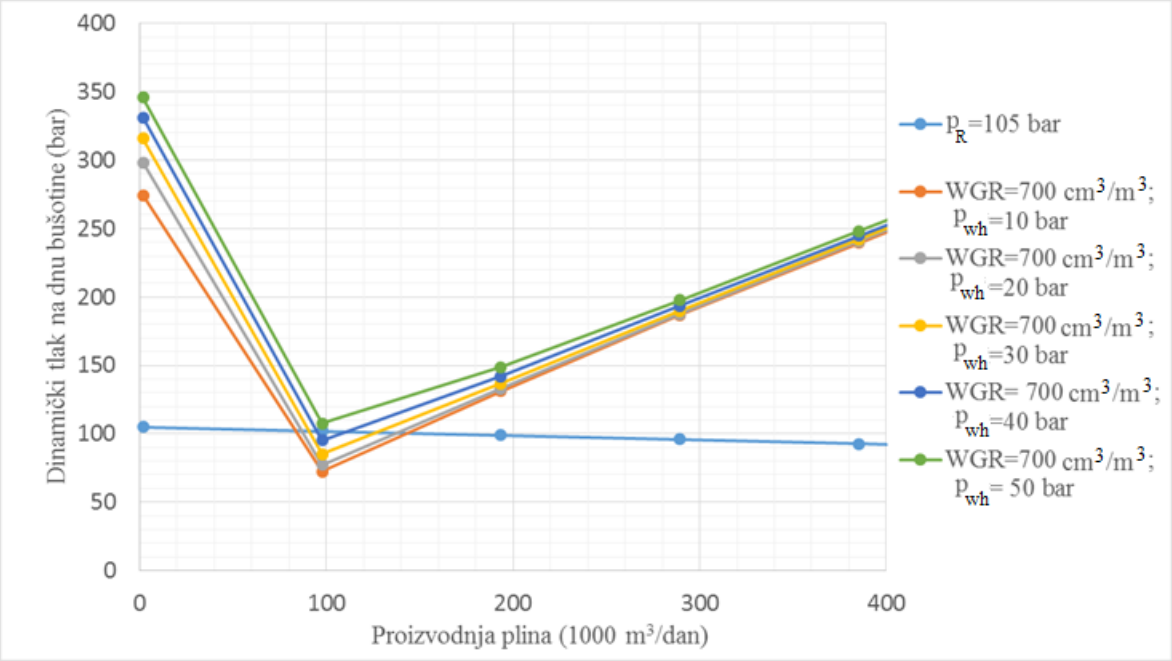
Slika 5-17. Utjecaj smanjenja ležišnog tlaka i WGR-a na proizvodni kapacitet bušotine

Prema tome, s obzirom na to da prirodni pad ležišnog tlaka nije moguće zaustaviti te da sve veći utok slojne vode nije moguće ublažiti, a da ne dođe do prestanka proizvodnje, jedini način poboljšanja VLP krivulje jest snižavanje dinamičkog tlaka na ušću bušotine, a time i dinamičkog tlaka na dnu, otvaranjem/povećanjem promjera površinske sapnice i/ili snižavanjem tlaka separatora na 30 bar, odnosno puštanjem bušotine u rad na nižem tlaku (srednjem tlaku sustava). Moguće je postići i dinamički tlak na ušću bušotine niži od 30 bar uvođenjem kompresorske proizvodnje postavljanjem kompresorskih stanica u (centralnu) plinsku stanicu, na početak priključnog plinovoda bušotine ili na samom ušću bušotine koje snižavaju dinamički tlak ušća i ostvaruju dovoljan tlak za pravilno funkcioniranje površinskog proizvodnog sustava što označava posljednju fazu proizvodnje plinsko-kondenzatnog ležišta. Eventualno poboljšanje IPR krivulje moguće je reperforiranjem postojećih i, ako se interpretacijom karotažnih mjerenja utvrdi zasićenje gornjih neraskrivenih slojeva plinom, perforiranjem novih gornjih intervala te redovnim kiselinskim pranjima proizvodnog niza i perforacija te kiselinskim obradama sloja, no to bi imalo vrlo mali ili neznatan učinak s obzirom na nizak ležišni tlak i loše karakteristike istoka uzrokovane povećanjem udjela slojne vode u proizvodnji.

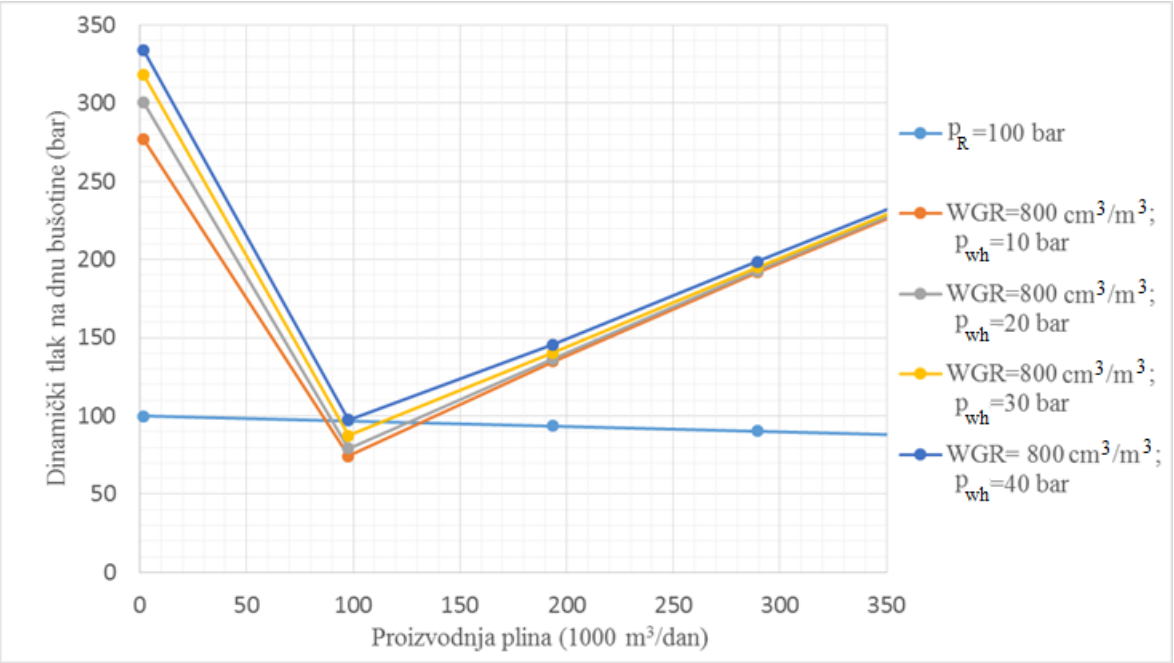
Na slikama 5-18., 5-19., 5-20., 5-21., 5-22. i 5-23. prikazana je prognoza proizvodnog kapaciteta bušotine X-1 snižavanjem dinamičkog tlaka na dnu bušotine uz smanjenje ležišnog tlaka i povećanje proizvodnje slojne vode dok su u tablici 5-3. prikazane vrijednosti dobivenih rezultata, odnosno radnih točaka za kombinacije VLP i IPR krivulja koje se sijeku. Na slici 5-23. je prikazano kako nakon smanjenja ležišnog tlaka na 80 bar i povećanja WGR-a na 1000 cm^3/m^3, ni sniženje dinamičkog tlaka na ušću na 5 bar uvođenjem kompresorske proizvodnje nije dovoljno da bi se proizvodnja mogla i dalje održati te se prema provedenoj analizi u svrhu ovoga rada može zaključiti da dostizanje navedenih uvjeta ležišnog tlaka i WGR-a predstavlja kraj kontinuirane proizvodnje bušotine X-1. Moguće je postići povremenu proizvodnju zatvaranjem bušotine i povremenim puštanjem u proizvodnju kada naraste tlak na ušću bušotine.



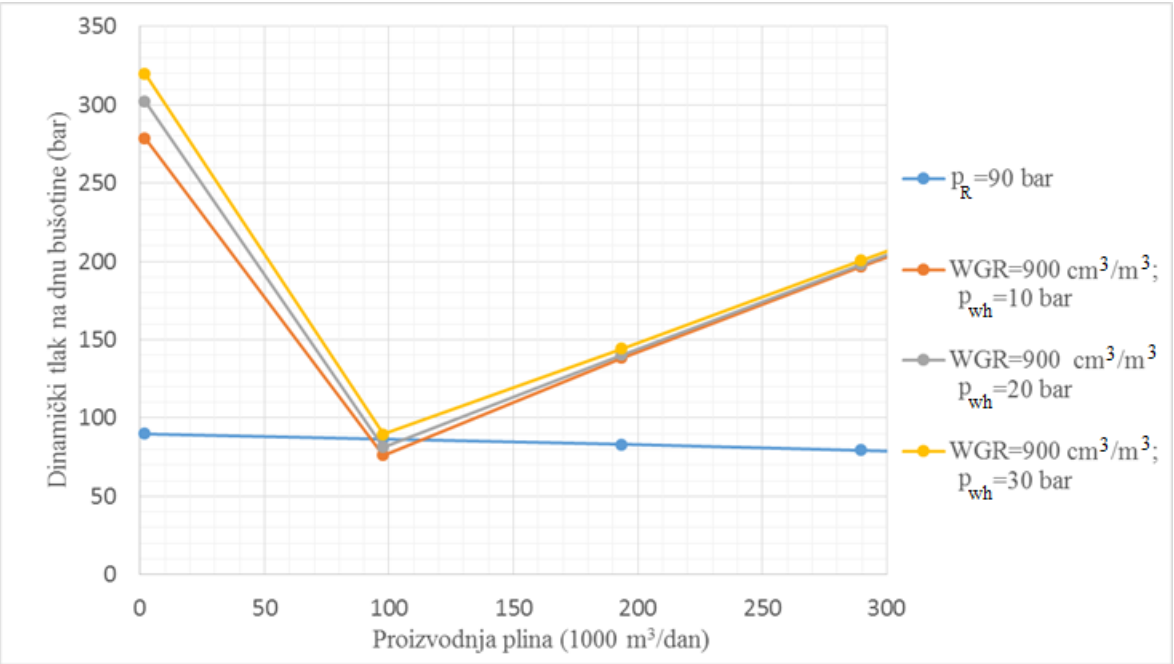
Slika 5-18. Utjecaj smanjenja dinamičkog tlaka na ušću bušotine pri trenutnim uvjetima ležišnog tlaka i WGR-a



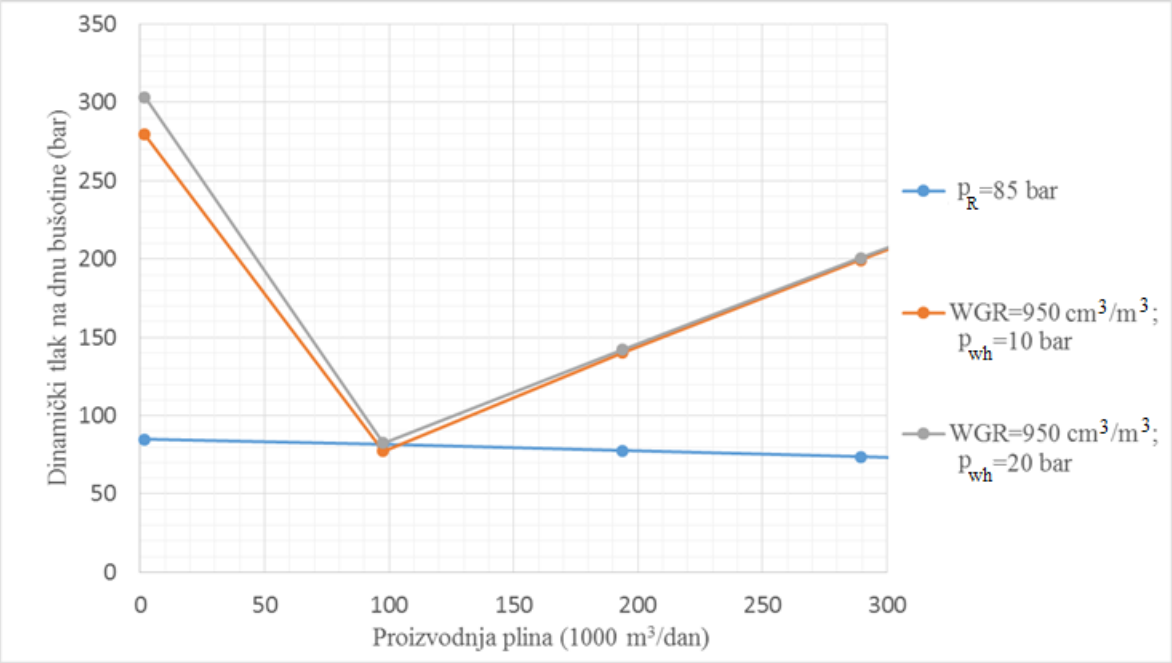
Slika 5-19. Utjecaj smanjenja dinamičkog tlaka na ušću bušotine pri ležišnom tlaku od 105 bar i WGR-u od 700 cm^3/m^3



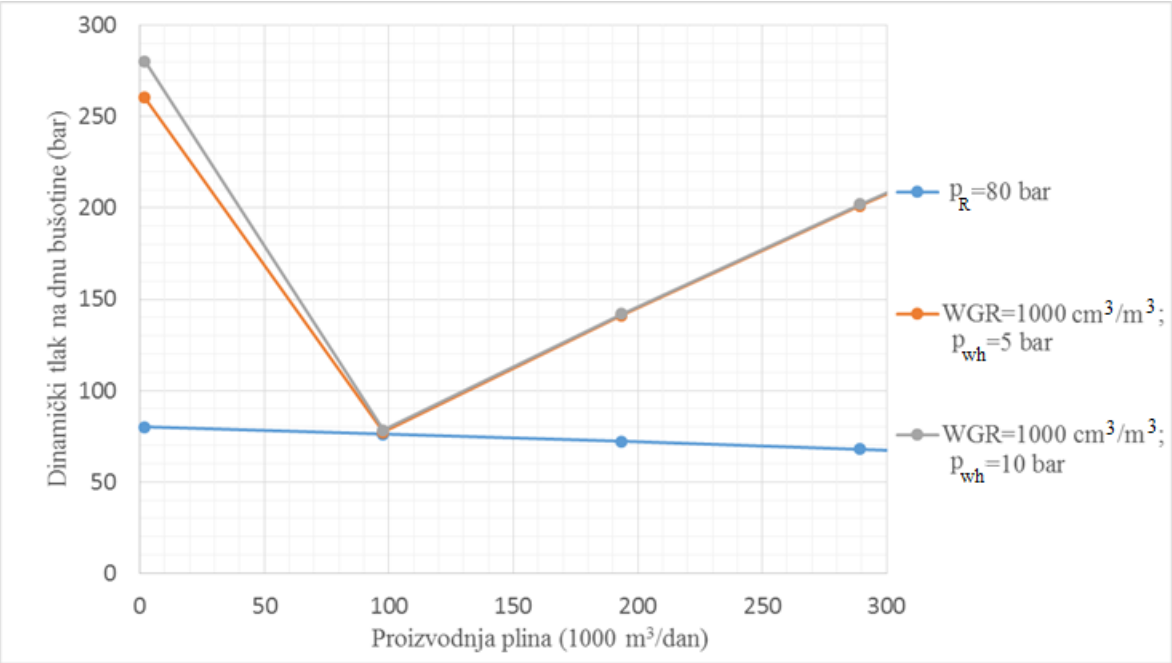
Slika 5-20. Utjecaj smanjenja dinamičkog tlaka na ušću bušotine pri ležišnom tlaku od 100 bar i WGR-u od 800 cm^3/m^3



Slika 5-21. Utjecaj smanjenja dinamičkog tlaka na ušću bušotine pri ležišnom tlaku od 90 bar i WGR-u od 900 cm^3/m^3



Slika 5-22. Utjecaj smanjenja dinamičkog tlaka na ušću bušotine pri ležišnom tlaku od 85 bar i WGR-u od 950 cm^3/m^3



Slika 5-23. Utjecaj smanjenja dinamičkog tlaka na ušću bušotine pri ležišnom tlaku od 80 bar i WGR-u od 1000 cm^3/m^3

Tablica 5-3. Radne točke dobivene analizom utjecaja smanjenja dinamičkog tlaka na ušću bušotine uz smanjenje ležišnog tlaka i povećanje WGR-a

	Dinamički tlak na ušću bušotine, bar	Proizvodnja plina, m^3/dan	Proizvodnja kondenzata, m^3/dan	Proizvodnja slojne vode, m^3/dan	Dinamički tlak na dnu bušotine, bar	Pad tlaka zbog trenja, bar	Hidrostatska komponenta pada tlaka, bar
p_R = 112,7 bar WGR = 623 cm^3/m^3	10	159 999	37,6	99,7	108,11	60,45	37,61
	20	154 737	36,4	96,4	108,26	49,59	38,64
	30	145 567	34,2	90,7	108,53	38,36	40,16
	40	130 383	30,6	81,2	108,98	26,55	42,42
	50	107 150	25,2	66,8	109,67	13,81	45,86
p_R = 105 bar WGR = 700 cm^3/m^3	10	143 517	33,7	100,5	100,58	53,68	36,86
	20	138 277	32,5	96,8	100,75	42,82	37,90
	30	127 487	30	89,2	101,09	31,36	39,72
	40	110 703	26	77,5	101,62	19,34	42,28
	50	-	-	-	-	-	-
p_R = 100 bar WGR = 800 cm^3/m^3	10	131 662	30,9	105,3	95,78	49,05	36,69
	20	125 618	29,5	100,5	95,98	38,05	37,90
	30	114 090	26,8	91,3	96,36	26,45	39,90
	40	-	-	-	-	-	-
p_R = 90 bar WGR = 900 cm^3/m^3	10	112 775	26,5	101,5	86,04	40,75	35,26
	20	105 641	24,8	95,1	86,3	29,55	36,73
	30	-	-	-	-	-	-
p_R = 85 bar WGR = 950 cm^3/m^3	10	103 593	24,3	98,4	81,17	36,65	34,50
	20	-	-	-	-	-	-
p_R = 80 bar WGR = 1000 cm^3/m^3	5	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-

6. ZAKLJUČAK

Glavna svrha i cilj proizvodnog inženjerstva jest postići maksimalnu proizvodnju na ekonomski isplativ način, odnosno uz minimalne troškove što se postiže optimizacijom proizvodnje. Optimizacijom proizvodnje nastoji se povećati proizvodnost ležišta, odnosno poboljšati karakteristike utoka fluida u ležište (IPR krivulju) i poboljšati karakteristike podizanja fluida s dna bušotine na površinu (VLP krivulju). Optimizacija cjelokupnog proizvodnog sustava podrazumijeva dobro poznavanje samog sustava i ležišnog fluida, a provodi se u računalnom programu Prosper primjenom NODAL (čvorišne) analize u kojoj se optimizira svaka pojedina komponenta sustava i odabire ona kombinacija karakteristika komponenti koja osigurava maksimalne proizvodne mogućnosti bušotine uz najniže troškove. Zbog toga je potrebno kontinuirano praćenje i kvalitetna analiza proizvodnih parametara kako bi se na vrijeme proveli potrebni radovi i optimizirao proizvodni sustav u svrhu ublažavanja prirodnog pada, odnosno produljenja proizvodnog vijeka bušotine i ostvarivanja konačnog većeg iscrpka iz ležišta.

U analiziranoj plinsko-kondenzatnoj bušotini provedeni su razni remontni radovi u svrhu optimizacije i poboljšanja proizvodnih karakteristika. Zbog velikog oštećenja pribušotinske zone (*skina*) i time velikog pada tlaka u pribušotinskoj zoni, bušotina je 2008. godine proizvodila na nižem tlaku sustava sve dok 2009. godine nije proveden uspješni kapitalni remont sloja, odnosno kiselinska obrada sloja kojom je smanjen *skin* efekt te povećana proizvodnja i dinamički tlak na ušću bušotine. Interpretacijom karotažnih dijagrama utvrdile su se povoljne ležišne karakteristike gornjih neraskrivenih intervala te se 2016. godine pristupilo perforiranju gornjih intervala i ugradnji novog proizvodnog niza većeg promjera u svrhu povećanja proizvodnih količina. Nakon remontnih radova 2016. godine proizvodnja slojne vode se udvostručila, a naredni remontni radovi imali su blagi učinak na poboljšanje proizvodnje.

Primjenom računalnog programa Prosper postavljen je model proizvodnog sustava bušotine X-1 te je isti podešen prema posljednjim dostupnim izmjerenim podacima. Analizom trenutnih proizvodnih mogućnosti utvrđeno je da, uslijed sve većeg utoka slojne vode, dolazi do smanjene brzine smjese, odnosno do pojave brzine nedovoljne za djelotvorno iznošenje kapljevite faze, a time i do zaostajanja slojne vode i kondenzata što povećava gubitke tlaka, odnosno smanjuje proizvodnju. U svrhu saniranja problema

nakupljanja kapljevine u bušotini analiziran je utjecaj ugradnje proizvodnog niza manjeg promjera, no analiza osjetljivosti je pokazala kako je ležišni tlak nedovoljan za svladavanje gubitaka tlaka zbog otpora trenja u takvom proizvodnom nizu. Analiza je pokazala da je jedini mogući način poboljšanja proizvodnih mogućnosti smanjenje dinamičkog tlaka na ušću otvaranjem sapnice, puštanjem bušotine u rad na nižem tlaku sustava, odnosno tlaku separatora od 30 bar ili uvođenjem kompresorske proizvodnje koja, uz mogućnost povremenog puštanja bušotine u rad kada poraste tlak na ušću, predstavlja zadnju fazu u proizvodnom vijeku analizirane bušotine.

7. POPIS LITERATURE

1. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. 1991. *API Recommended Practice 14E (RP 14E); Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping System*. Peto izdanje. Washington, SAD: American Petroleum Institute.
2. BEGGS, H. D. 1985. *Gas Production Operations.* Tulsa, Oklahoma: OGCI Publications.
3. BEGGS, H. D. 2003. *Production Optimization Using Nodal Analysis.* Tulsa, Oklahoma: OGCI and Petroskills Publications.
4. BRKIĆ, V. 2017(a). Prezentacije s predavanja iz kolegija *Proizvodnja nafte i plina II*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu (neobjavljeno).
5. BRKIĆ, V. 2017(b). Prezentacije s predavanja iz kolegija *Obrada stijena u bušotinama.* Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu (neobjavljeno).
6. BRKIĆ, V., TIŠLJAR, T. 2018. *Optimizacija proizvodnje plinskih bušotina s visokim udjelom slojne vode*, Nafta i plin, znanstveno-stručno glasilo Hrvatske udruge naftnih inženjera i geologa, 38 (153/2018), str. 48-56. 9. međunarodna konferencija i izložba o naftno-plinskom gospodarstvu, 3.-4. listopada 2017. Šibenik.
7. COLEMAN, S. B., CLAY, H. B. McCURDY, D. G. NORIS III, H. L. 1991. *A New Look of Predicting Gas - Well Load - Up*. Journal of Petroleum Technology, ožujak 1991.
8. CROSCO, NAFTNI SERVISI, d.o.o. 2008. *Tehnička dokumentacija*.
9. CROSCO, NAFTNI SERVISI, d.o.o. 2015. *Tehnička dokumentacija*.
10. CROSCO, NAFTNI SERVISI, d.o.o. 2016. *Tehnička dokumentacija*.
11. ČIKEŠ, M. 2015. *Proizvodno inženjerstvo nafte i plina.* Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
12. GOLAN, M., WHITSON, C. H. 1985. *Well Performance*. Trondheim, Norveška: NTH.

13. GRAY, H. E. 1974. *Vertical Flow Correlation in Gas Wells*. User manual for API 14B, Subsurface controlled safety valve sizing computer program, App. B (lipanj 1974.).

14. HOSSAIN, M. S. 2008. *Production Optimization and Forecasting.* Petroleum and Mineral Resource Engineering Department BUET, 29.-30. travnja 2008.

15. HRNČEVIĆ, L., KARASALIHOVIĆ SEDLAR, D., MUVRIN, B., KRIŠTAFOR, Z. 2008. *Management of Greenhouse Gases Produced During Natural Gas Production in Croatia.* 1st International Petroleum Environmental Conference and Exhibition, 12.-14. svibnja 2008. Tripoli, Libija.

16. HRNČEVIĆ, L., SIMON, K., KRIŠTAFOR, Z., MALNAR, M. 2010. *Long-lasting Experience in Environmental Protection During Sour Gas Reservoir Exploitation.* SPE Deep Gas Conference and Exhibiton, 24.-26. siječnja 2010. Manama, Bahrein.

17. HRVATSKI GEOLOŠKI INSTITUT. 2014. *Rudarsko - geološka studija Koprivničko - križevačke županije*. Zagreb.

18. INA - INDUSTRIJA NAFTE, d.d. 1989. *Tehnička dokumentacija*.

19. INA - INDUSTRIJA NAFTE, d.d. 2008. *Tehnička dokumentacija.*

20. INA - INDUSTRIJA NAFTE, d.d. 2009. *Tehnička dokumentacija.*

21. INA - INDUSTRIJA NAFTE, d.d. 2010. *Tehnička dokumentacija.*

22. INA - INDUSTRIJA NAFTE, d.d. 2015. *Tehnička dokumentacija*.

23. INA - INDUSTRIJA NAFTE, d.d. 2016. *Tehnička dokumentacija*.

24. INA - INDUSTRIJA NAFTE, d.d. 2017. *Godišnje izvješće 2017.*

25. INA - INDUSTRIJA NAFTE, d.d. 2017. *Tehnička dokumentacija*.

26. INA - INDUSTRIJA NAFTE, d.d. 2018. *Tehnička dokumentacija*.

27. KOŠČAK KOLIN, S. 2015. Prezentacije s vježbi iz kolegija *Proizvodnja nafte i plina I.* Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu (neobjavljeno).

28. KOŠČAK KOLIN, S., KORENJAK, Z., ČIKEŠ, M. 2009. *Modeliranje proizvodnog sustava bušotine opremljene plinskim liftom primjenom programa Prosper*. Pregledni rad. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Vol. 21, str. 73-81.

29. MLINARIĆ, Ž., ZELIĆ, M. 1994. *Twelve Years Experience in Gas Production on the Molve, Kalinovac and Stari Gradac Fields.* World Petroleum Council. 14th World Petroleum Congress, 29. svibnja - 1. lipnja. Stavanger, Norveška.

30. MOHAMED, A. M. 2014. *Evaluation of PROSPER for Modeling Long Lateral Gas Well Productivity in Toe Up, Toe Down, Horizontal Well Geometry*. Diplomski rad. Rolla: Missouri University of Science and Technology.

31. MRŠIĆ, Z. 2006. *„Prosper" programski paket za projektiranje proizvodnog opremanja, optimalizaciju i prognozu rada bušotina*. Ivanić-Grad: INA - Industrija nafte, d.d.

32. PERIĆ, M. 2007. *Englesko - hrvatski enciklopedijski rječnik istraživanja i proizvodnje nafte i plina.* Zagreb: INA - Industrija nafte, d.d.

33. PETROLEUM EXPERTS, Ltd. 2011. *User Manual: IPM Prosper Version 11.5*. Edinburgh.

34. SIMON, K. 2017. *Izdvajanje kiselih plinova.* Prezentacija s predavanja iz kolegija *Sabiranje i transport nafte i plina II.* Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu (neobjavljeno).

35. TIŠLJAR, V., MLINARIĆ, Ž., ZELIĆ, M., MILIVOJEVIĆ, V. 2015. *Konstrukcija i proizvodno opremanje bušotina - tehnološka rješenja za proizvodnju plina na polju Molve.* 8. međunarodna konferencija i izložba o naftno-plinskom gospodarstvu, 13.-16. listopada 2015. Šibenik.

36. TIŠLJAR, V., ZELIĆ, M. 2016. *Konstrukcija i proizvodno opremanje bušotina za najteže uvjete proizvodnje na polju Molve.* Nafta i plin, znanstveno-stručno glasilo Hrvatske udruge naftnih inženjera i geologa, 36 (147/2016.), str. 41-45.

Internetski izvori:

1. ANKUR, M. 2011. *Erosion due to Flow.*
   URL: http://www.cheresources.com/invision/blog/4/entry-190-erosion-due-to-flow (20.11.2018.).

2. BRATLAND, D. 2013. *Pipe Flow 2: Multi-Phase Flow Assurance (2nd ed.)*
   URL: http://www.bratland.com/PipeFlow2/chapter1.html (8.11.2018.).

3. PETROLEUM EXPERTS, Ltd. 2018. *PROSPER: Multiphase Well and Pipeline Nodal Analysis*.
   URL: http://www.petex.com/products/ipm-suite/prosper (25.11.2018.).

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad pod naslovom „Modeliranje i analiza proizvodnog sustava bušotine na plinsko-kondenzatnom polju „Duboke Podravine“ izradio samostalno, uz savjete mentora, na temelju znanja i vještina stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu i služeći se navedenom literaturom.

Tomislav Glibo

_____