

Razrušavanje stijena mlazom fluida

Vratarić, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:937342>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-01**



Repository / Repozitorij:

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



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

RAZRUŠAVANJE STIJENA MLAZOM FLUIDA

Diplomski rad

Tomislav Vratarić

N-139

Zagreb, 2017

RAZRUŠAVANJE STIJENA MLAZOM FLUIDA

TOMISLAV VRATARIC

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Sažetak

Razrušavanje stijena mlazom fluida je relativno nova metoda u naftnoj industriji kojom se može, posredno povećati pridobivanje ugljikovodika iz ležišta. Koristi se većinom u vertikalnim bušotinama te ležištima koja su se crpila godinama te se pridobivane količine ugljikovodika kontinuirano smanjivale tijekom godina. Za razrušavanje se koristi visokotlačni mlaz fluida s ciljem bušenja dva ili više lateralnih (horizontalnih) kanala iz vertikalnog dijela kanala bušotine. Duljine lateralnih dionica kanala bušotine izbušene mlazom fluida su različite, ovisno o samom projektu s maksimalnom duljinom od 100 m. Ovaj diplomski rad nastoji objasniti osnove razrušavanja stijena mlazom fluida, površinsku i dubinsku opremu, eksperimentalne pokuse te primjenu u praksi. U radu će biti prikazani i objašnjeni radovi koji su se izveli u Hrvatskoj na domaćim naftnim poljima, te u inozemstvu. Ključne riječi: razrušavanje stijena mlazom fluida, laterale, mlaznice, savitljivi tubing. Diplomski rad sadrži: 56 stranica, 8 tablice, 35 slika i 9 referenci. Jezik izvornika: Hrvatski

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

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

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a
2. Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNF-a
3. Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF-a

Datum obrane: 19.05.2017., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

JET DRILLING

TOMISLAV VRATARIĆ

Thesis completed in: University in Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Abstract

Radial jet drilling is a relatively new drilling method in petroleum industry which indirect purpose is to increase reservoir production. It is mostly used in vertical wellbore drilling and in drilling through depleted reservoirs which production has decreased over the years. A high-pressure jet of fluid is used to drill through the rock with an aim of drilling two or more lateral layers from the vertical wellbore. The length of the laterals are various, depending on the project parameters with a maximal length of 100 meters. This master's thesis is concentrated on explaining how radial jet drilling functions, equipment used in the process, experimental tests and application in practice. Also, in the thesis a short overview of radial jet drilling done in Croatia and in countries abroad will be given.

Keywords: jet drilling, laterals, jets, coil tubing

Thesis contains: 56 pages, 8 tables, 35 figures and 9 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Assistant Profesor Borivoje Pašić, PhD

Reviewers: Assistant Profesor Borivoje Pašić, PhD
Full professor Nediljka Gaurina-Medimurec, PhD
Full professor Zdenko Krištafor, PhD

Date of defense: May 19th, 2017., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ:

POPIS SLIKA.....	I
POPIS TABLICA	III
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA.....	IV
1. UVOD	1
2. OSNOVE RAZRUŠAVANJA STIJENA MLAZOM FLUIDA.....	2
2.1. Mehanizam razrušavanja stijena	5
2.2. Konstrukcija mlaznica	5
2.3. Isplaka	10
3. PODZEMNA OPREMA ZA BUŠENJE MLAZOM FLUIDA.....	11
3.1. Alatka za otklanjanje kanala bušotine	12
3.2. Sklop za reguliranje brzine bušenja	13
3.3. Kućište uređaja za kontrolu brzine bušenja	14
3.4. Radni i bušači niz	16
3.5. Konusna mlaznica.....	16
3.6. Promjenjiva visokotlačna brtvenica.....	16
3.6.1. Djelovanje sila na bušaće alatke	17
4. PRIPREMA BUŠOTINE ZA IZRADU LATERALA	19
4.1. Nadzemna oprema	20
5. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA	22
5.1. Postupak ispitivanja sile izbacivanja	24
5.2. Postupak ispitivanja sile rastezanja	25
5.3. Optimizacije hidrauličkog sustava	25
5.4. Optimizacije sustava protjecanja radnog fluida	35
5.5. Procedura hidrauličkog dizajna i terenska primjena.....	37
5.6. Optimiranje hidrauličkog sustava.	38
5.7. Maksimalni protok.....	38
5.8. Minimalni protok.....	39
5.9. Optimalni protok	40
6. PRIMJERI RAZRUŠAVANJA STIJENA MLAZOM FLUIDA U HRVATSKOJ I INOZEMSTVU	41

6.1. Bušotina A (Kina).....	41
6.2. Polje Donelson West u Kansasu.....	43
6.2.1. Povijest eksploatacije ležišta ugljikovodika na polju Donelson West	43
6.2.2. Razvoj polja	46
6.3. Bušotina Žu-9	48
6.3.1. Opis radova na bušotini Žu-9.....	53
7. ZAKLJUČAK	55
8. LITERATURA	56

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Ilustrativni prikaz višekanalnih bočnih bušotina.....	2
Slika 2-2. Shematski prikaz razrušavanja stijene mlazom fluida.....	3
Slika 2-3. Razrušavanje stijena mlazom fluida.....	4
Slika 2-4. Buckmanova konusna mlaznica.....	6
Slika 2-5. Konusna mlaznica tipa Leach-Walker.....	6
Slika 2-6. Konusna mlaznica s krilcima tipa Vortex.....	7
Slika 2-7. Izlazni mlaz na Leach-Walker mlaznici pri tlaku od 0,4 MPa.....	7
Slika 2-8. Konusne mlaznice s kutom povijenosti krilaca 14° i 30° te rezultirajući izlazni mlaz.....	8
Slika 2-9. Pulsirajuća mlaznica tipa Intermittent.....	8
Slika 2-10. Rotirajuća mlaznica tipa Rotary.....	9
Slika 3-1. Bušotina s ultrakratkim radijusom zakrivljenja.....	11
Slika 3-2. Alatka za otklanjanje kanala bušotine (klin) Mark III i usmjeravanje alata u položaj za bušenje.....	13
Slika 3-3. Kućište uređaja za kontrolu brzine bušenja.....	15
Slika 3-4. Djelovanje sile na niz bušaćih cijevi.....	18
Slika 4-1. Tri faze izrade laterale.....	21
Slika 5-1. Shematski prikaz eksperimentalnog sustava za istraživanje mogućnosti razrušavanja stijene mlazom fluida.....	22
Slika 5-2. Mlazno dlijeto (a), usmjerivač (b) i visokotlačno crijevo (c).....	24
Slika 5-3. Smanjenje tlaka u visokotlačnom crijevu.....	28
Slika 5-4. Smanjenje tlaka u mlaznom dlijetu.....	29
Slika 5-5. Analiza sila tijekom mlaznog bušenja.....	30
Slika 5-6. Samopokrećuće mlazno dlijeto koje se sastoji od više mlaznica.....	31
Slika 5-7. Sila izbacivanja mlaznog dlijeta.....	33
Slika 5-8. Otpor usmjerivača.....	35
Slika 5-9. Uzorci mekog pješčenjaka i ugljena korišteni u opisanom ispitivanju.....	36
Slika 5-10. Optimiranje hidrauličkog sustava kod mlaznog bušenja.....	37
Slika 5-11. Ovisnost smanjenja tlaka o protoku tijekom izrade 3. laterale.....	39
Slika 5-12. Ovisnost unutarnjeg tlaka o protoku visokotlačnog crijeva i savitljivog tubinga tijekom izrade 3. laterale.....	39

Slika 5-13. Utjecaj otpora na lateralno kretanje niza i sile izbacivanja mlaznog dlijeta kod izrade treće laterale	40
Slika 6-1. Usporedba terenskih mjerenja i modela za primjer izrade laterale broj četiri	42
Slika 6-2. Prikaz smanjenja eksploatacije na polju Donelson West.....	44
Slika 6-3. Povijesno pridobivanje ugljikovodika na polju Donelson West	45
Slika 6-4. Prije mlaznog bušenja na ‘starim’ bušotinama pridobiveno je 32 m ³ /mjesec ugljikovodika, dok su nakon stimulacija pridobivene količine narasle na 80 m ³ /mjesec	47
Slika 6-5. Predviđeni smjer laterala na bušotini Žu-9	49
Slika 6-6. Prikaz planiranih radova na bušotini Žu-9.....	51
Slika 6-7. Prikaz izvedenih radova na bušotini Žu-9	52

POPIS TABLICA

Tablica 5-1. Karakteristike pojedinih dijelova eksperimentalne opreme za ispitivanje tehnologije mlaznog bušenja	23
Tablica 5-2. Izračunati i izmjereni omjer protoka prednjih i stražnjih mlaznica	32
Tablica 5-3. Eksperimentalni podaci ispitivanja graničnog tlaka raspucavanja stijena	36
Tablica 5-4. Podaci o ležištu i bušotini A	37
Tablica 5-5. Sastav alata na dnu bušotine A.....	38
Tablica 6-1. Operativni parametri tijekom izrade pojedine laterale na bušotini A.....	41
Tablica 6-2. Prikaz povijesti eksploatacije ugljikovodika na polju Donelson West prije i nakon stimulacije mlaznog bušenja	46
Tablica 6-3. Podaci o ležištu Gama 1 na bušotini Žu-9	50

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

a = korelacijski koeficijent ili otpor usmjerivača, bezdimenzionalan

A = ukupna površina mlaznice, mm²

A_0 = unutarnja površina poprečnog presjeka mlaznog dlijeta, mm²

b = korelacijski koeficijent ili otpor usmjerivača, bezdimenzionalan

C = koeficijent izbacivanja mlaznog dlijeta, bezdimenzionalan

d = unutarnji promjer savitljivog tubinga, m

d_b = promjer stražnje mlaznice mlaznog dlijeta, mm

d_c = promjer prednje centralne mlaznice mlaznog dlijeta, mm

d_f = promjer prednje mlaznice mlaznog dlijeta, mm

d_{hi} = unutarnji promjer visokotlačnog crijeva, m

d_i = unutarnji promjer cijevi, m

d_{ne} = ekvivalentni promjer mlaznica, mm

d_0 = unutarnju promjer mlaznog dlijeta, mm

D = promjer koluta za namatanje savitljivog tubinga, m

D_c = omjer promjera mlaznog dlijeta i centralne mlaznice, m

D_b = omjer promjera mlaznog dlijeta i stražnje mlaznice, m

f = Faningov faktor trenja, bezdimenzionalan

F = lateralno pružajuća sila, N

F_{bit} = sila izbacivanja mlaznog dlijeta, N

F_f = otpor usmjerivača, N

F_r = lateralno pružajući otpor, N

F_w = otpor stjenki bušotine, N

K = omjer brzine protoka između prednje i stražnjih mlaznica, bezdimenzionalan

L = duljina cijevi, m

L_{cT} = duljina spiralnog dijela savitljivog tubing namotanog na bubanj, m

L_h = duljina visokotlačnog crijeva, m

L_{sT} = duljina ravnog dijela savitljivog tubing, m

m = koeficijent samopokretanja mlaznica, bezdimenzionalan

n_b = broj stražnjih mlaznica mlaznog dlijeta, broj

n_c = broj prednjih centralnih mlaznica mlaznog dlijeta, broj

n_f = broj prednjih mlaznica mlaznog dlijeta, broj

N_{Re} = Reynoldsov broj, bezdimenzionalan

Q_{bh} = težina visokotlačnog crijeva uronjenog u vodu po metru, N/m

Q = protok fluida, m³/s

S = koeficijent područja prednjeg lica mlaznog dlijeta, bezdimenzionalan

v = brzina fluida, m/s

α = korelacijski koeficijent, bezdimenzionalan

Δ = hrapavost stjenke savitljivog tubinga, m

Δp_b = pad tlaka u mlaznom dlijetu, MPa

Δp_{cT} = pad tlaka u spiralnoj sekciji savitljivog tubinga, Pa

Δp_L = tlak utiskivanja, MPa

Δp_{sT} = pad tlaka u ravnoj sekciji savitljivog tubinga, Pa

Δp_{ss} = pad tlaka u glatkoj cijevi, Pa

Δp_h = pad tlaka u visokotlačnom crijevu, Pa

Δp_i = pad tlaka u savitljivom tubing, Pa

θ_f = difuzijski kut prednjih mlaznica, °

θ_b = difuzijski kut stražnjih mlaznica, °

μ = dinamička viskoznost fluida, Pa·s

μ_s = koeficijent kliznog trenja, bezdimenzionalan

ρ = gustoća fluida, kg/m³

χ = faktor stražnjeg protoka, bezdimenzionalan

Δp_{inner} = unutarnji tlak visokotlačnog crijeva

1. UVOD

Razrušavanje stijena mlazom fluida, odnosno mlazno bušenje (*engl. jet drilling*) patentirala je američka tvrtka Petrolphysics sredinom 80-tih godina. Kompanija je razvila tehnologiju razrušavanja stijena mlazom primjenjivu na naftnim poljima. Ta se tehnologija temelji na teoriji mlaznica i mlazu koji razrušava stijenu, a primjenom ove tehnologije izrađuju se bočni kanali (laterale) s veoma kratkog radijusa zakrivljenja.

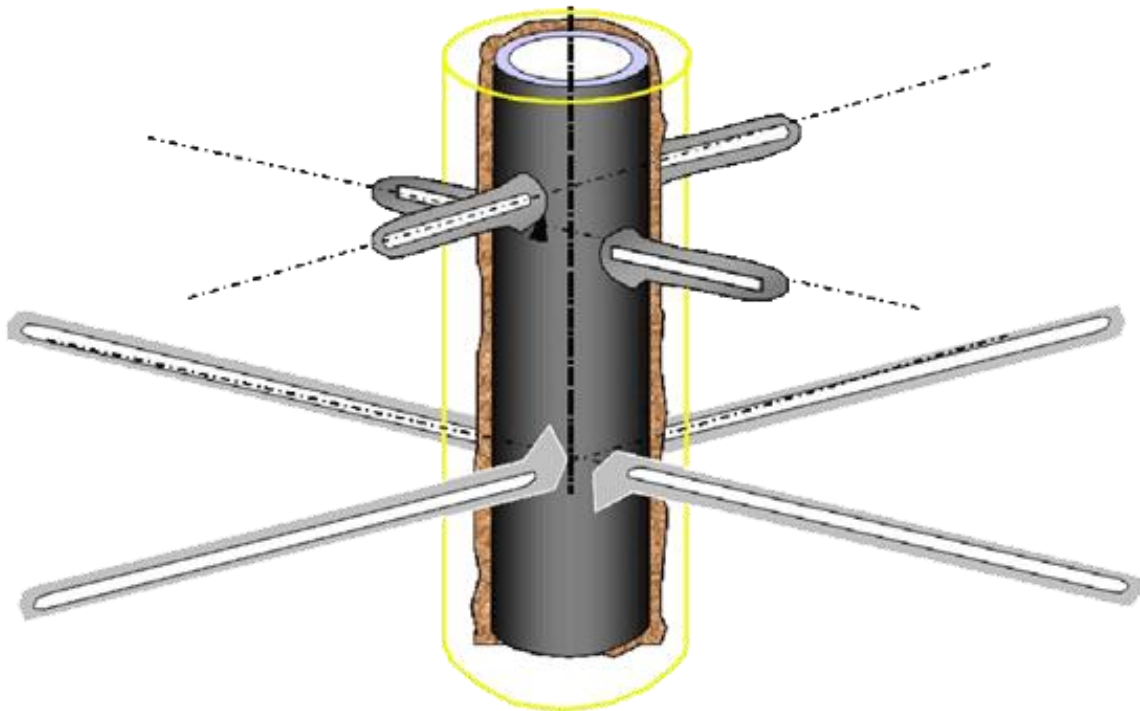
Razrušavanje stijena mlazom fluida je novija tehnologija izrade lateralnih bušotina, te se više ili manje uspješno primjenjuje u praksi, od njenih početaka sredinom 80-tih godina pa sve do danas. Mlazno bušenje većinom se koristi u bušenju plitkih, mekih, metanskih ležišta vezanih uz ležišta ugljena. Do sada je ova tehnologija primjenjena u raznim zemljama kao što su: SAD, Kanada, Kina i Argentina (Bin et al., 2016). Danas, kako je tehnologija mlaznog bušenje napredovala postoje više firmi poput BRITISH PETROLEUM, RADIAL DRILLING SERVICES, BUCKMAN, CHEVRON, TOTAL itd. iskustvom u bušenju ovakvih bušotina (Bin et al., 2016).

Primjenom ove tehnologije, razrušavanje stijena postiže se visokotlačnim mlazom fluida koji prodire u stijenu stvarajući bočni kanal (lateralu) u jednom ili više slojeva iz glavne bušotine (Bin et al., 2016). Duljina savitljivog tubing (fleksibilnog crijeva) koji izlazi iz vertikalnog dijela bušotine i ulazi u horizontalni stvarajući lateralu može biti do 100 m, a promjer mlaznica do 0,0508 m (2 in). Ova tehnologija prikladna je za razradu slabo propusnih ležišta, plitkih marginalnih ležišta, ležišta metana u slojevima ugljena, te istraživanje oštećenja pribušotinske zone, konusiranja vode i plina te heterogenosti ležišta (Bin et al., 2016). Mlazno bušenje može pomoći u rješavanju problema oštećenja sloja i smanjivanja proizvodnje na način da zamjeni neku od navedenih operacija: perforacije, kemijske obrade, frakturiranje itd.

Višekanalne bočne bušotine se mogu izvoditi iz starih bušotina koje su već dugo u fazi eksploatacije kako bi se povećao konačni iscrpak iz ležišta te produljio vijek eksploatacije ležišta.

2. OSNOVE RAZRUŠAVANJA STIJENA MLAZOM FLUIDA

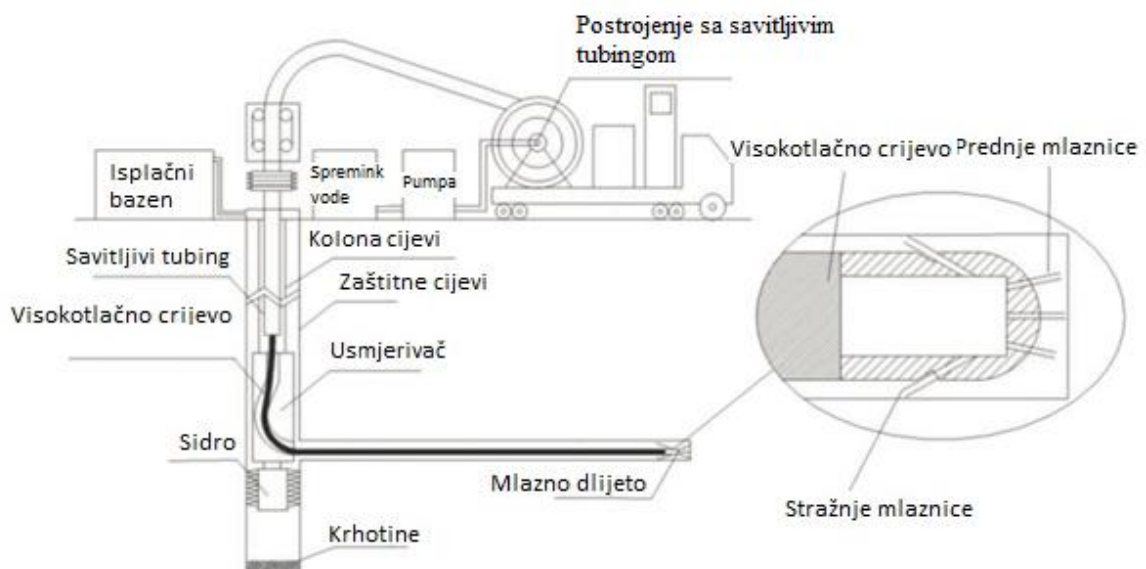
Na slici 2-1 dan je ilustrativni prikaz višekanalnih bočnih bušotina. Iz slike je vidljivo da je iz postojećeg vertikalnog kanala moguće izvesti više bočnih (lateralnih) dionica na različitim dubinama.



Slika 2-1. Ilustrativni prikaz višekanalnih bočnih bušotina (Dickinson et al., 1992a)

Osim u inozemstvu, razrušavanje stijena mlazom fluida primjenjeno je i u Hrvatskoj s ciljem ispitivanja primjenjivosti nove tehnologije na hrvatskim eksploatacijskim poljima. Kompanija INA d.d. odlučila se primjeniti ovu tehnologiju i napraviti nekoliko pokusnih bušenja na nekoliko lokacija o čemu će detaljnije biti govora u nastavku.

Tehnologija mlaznog bušenja (slika 2-2) uvelike se razlikuje od konvencionalne metode bušenja, koji podrazumjeva (u najjednostavnijem smislu) primjenu niza bušaćih alatki sastavljenih od bušaćih šipki i dubinskog bušaćeg sklopa. Stijena se razrušava visokotlačnim mlazom fluida koji izlazi iz mlaznice (mlaznog dlijeta). Prije samog početka bušenja, prvo se usidri usmjerivač kod ciljane formacije. Nakon toga se glodač kolone zaštitnih cijevi spušta u bušotinu kako bi se uklonio dio zaštitnih cijevi i cementnog kamena, odnosno napravio otvor za izradu lateralne dionice. Kada su uklonjene zaštitne cijevi i cementni kamen na ciljanom dijelu kanala bušotine, spušta se u bušotinu savitljivi tubing s mlaznim dlijetom na vrhu niza sve do željene formacije. Zatim se započinje s utiskivanjem fluida pod visokim tlakom (slika 2-3). Samopokretajuće mlazno dlijeto sastoji se od prednjih i stražnjih mlaznica. Prednja mlaznica razrušava stijenu te stvara kanal bušotine, dok stražnja mlaznica potiskuje (gura) dlijeto prema naprijed te proširuje lateralni promjer iza dlijeta.



Slika 2-2. Shematski prikaz razrušavanja stijene mlazom fluida (Bin et al., 2016)



Slika 2-3. Razrušavanje stijena mlazom fluida (Bin et al., 2016)

U konvencionalnom bušenju hidraulički dizajn, odnosno optimiranje sustava ispiranja bušotine ima za cilj maksimiziranje brzine bušenja uzimajući u obzir različite parametre poput: troškova, oblika putanje kanala bušotine, stabilnosti kanala bušotine, operativnih karakteristika opreme i cijevi te efikasnost uklanjanja krhotina iz kanala bušotine. Kod mlaznog bušenja, proces bušenja se bazira na stražnjim mlaznicama koje potiskuje mlazno dljeto prema naprijed te na prednjem sustavu mlaznica za razrušavanje stijene.

Skoro 50 do 70% krhotina razrušenih stijena imaju promjer manji od 1 mm. Kako su brojevi hodova isplačnih sisaljki tijekom mlaznog bušenja manji nego u konvencionalnom bušenju većina manjih krhotina podiže se do površine, dok veće krhotine padaju na dno glavnog kanala bušotine što se može vidjeti na slici 2-2. Taj prostor dna glavnog kanala bušotine dostatan je za akumuliranje svih krhotina koje nastaju ovom metodom bušenja (Bin et al., 2016).

2.1. Mehanizam razrušavanja stijena

Postoje tri osnovna mehanizma razrušavanja stijene kod mlaznog bušenja: erozija, poro-elastična napetost i kavitacija (Buckman Jet Drilling, 2003). Mlaz fluida pod visokim tlakom i velikom brzinom izlazi iz mlaznog dlijeta kroz male otvore mlaznica, udara u stijenu te ju razrušava. Do poro-elastične napetosti dolazi kada fluid pod visokim tlakom ulazi u porni prostor, povećava tlak u porama što dovodi do loma stijene. Nagli porast slojnog tlaka uzrokuje i kavitaciju (pojava isparavanja vode), čime se stvaraju mjehuri vodene pare u područjima manjeg tlaka koji trenutačno implodiraju stvarajući udarne valove (udare) koji povećavaju efekt loma formacije. Razrušavanje koničnim mlazom se postiže međusobnim kontaktom koničnog mlaza isplake i stijene koja se buši formirajući pri tome vrtložno gibanje ("torus").

"Torus" rotira oko izlazne osi mlaznice i oko vlastite osi koja je okomita na os bušenja.

2.2. Konstrukcija mlaznica

Za razrušavanje stijena mlazom fluida koriste se konusne mlaznice. Postoje različiti tipovi i proizvođači mlaznica no sve rade na istom principu, odnosno razrušavaju stijenu mlazom fluida velike brzine.

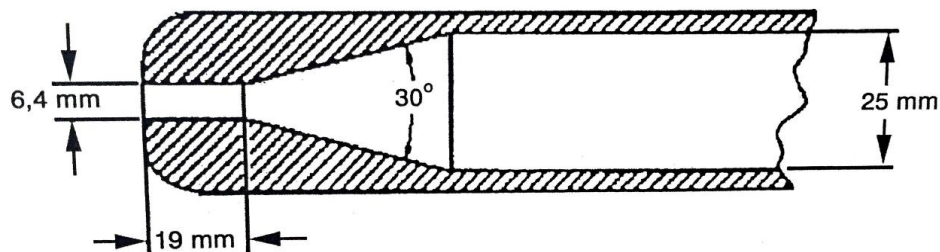
Na slici 2-4. prikazana je Buckmanova konusna mlaznica.



Slika 2-4. Buckmanova konusna mlaznica (Buckman Jet Drilling, 2003)

Kompanija Buckman je ovu mlaznicu razvijala od 2003. godine. Vrlo je učinkovita, ekonomična te se može koristiti u različitim formacijama. Prednji otvor mlaznice stvara konusni mlaz isplake pod visokim tlakom za razrušavanje stijena dok stražnji mlazovi tjeraju mlaznicu naprijed stvarajući u stijeni oblik zvijezdice, što ove mlaznice razlikuje od ostalih.

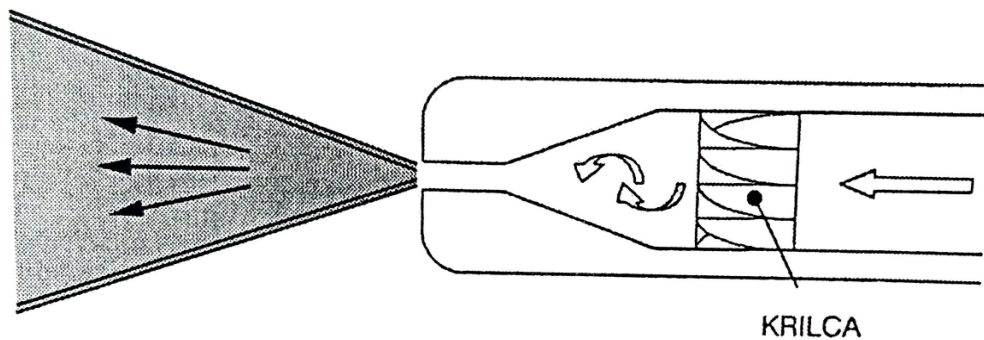
Konusna mlaznica tipa Leach-Walker primjenjuje se kada je potrebna velika brzina mlaza radi osiguranja umjerenog toka mlaza uz maksimalno 2° kutne divergencije (Dickinson et al., 1989) (slika 2-5).



Slika 2-5. Konusna mlaznica tipa Leach-Walker (Dickinson et al., 1989)

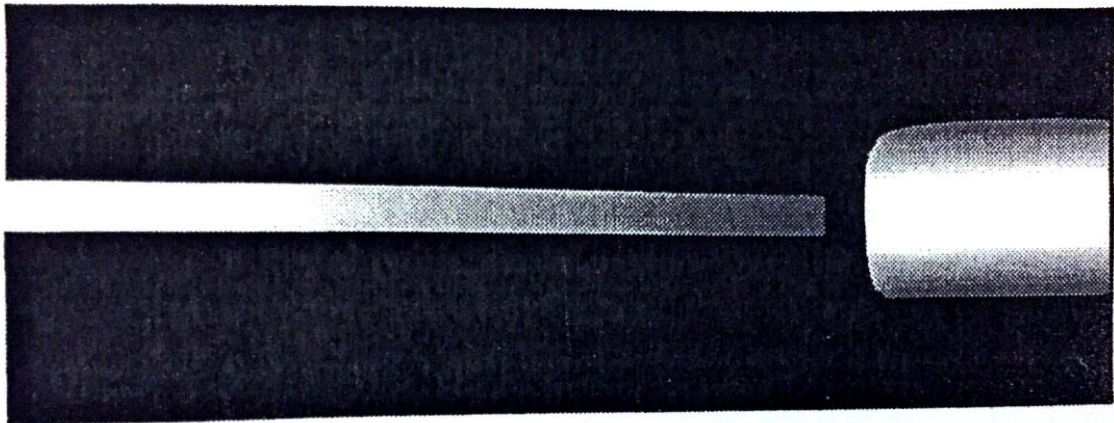
Konusna mlaznica s krilcima tipa Vortex ima izlazni profil mlaza u obliku logaritamske spirale. Koristi se kod manjih protoka i tlakova za postizanje istih učinaka bušenja (slika 2 -6).

Konusni profil mlaza postiže se postavljanjem kompleta fiksnih krilaca uzvodno od ulaznog konvergentnog dijela mlaznice tipa Leach-Walker. Pošto su krilca povijena, vodeni tok dobiva veću rotaciju u konvergiranom dijelu mlaznice te zadržava rotaciju i u ravnom dijelu mlaznice (Kovačević, 2004).



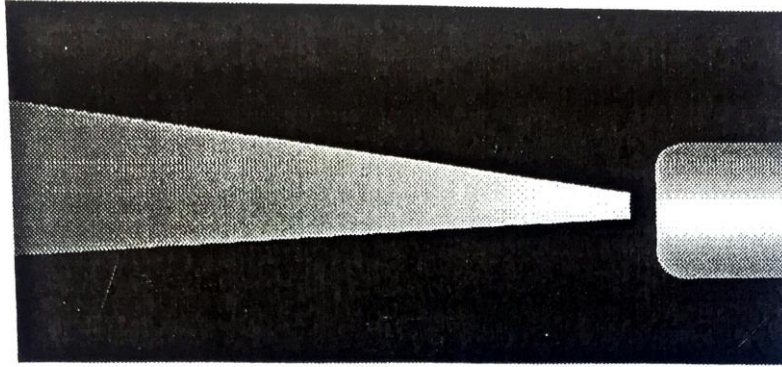
Slika 2-6. Konusna mlaznica s krilcima tipa Vortex (Kovačević, 2004)

Slika 2-7 prikazuje divergenciju mlaza od 2°

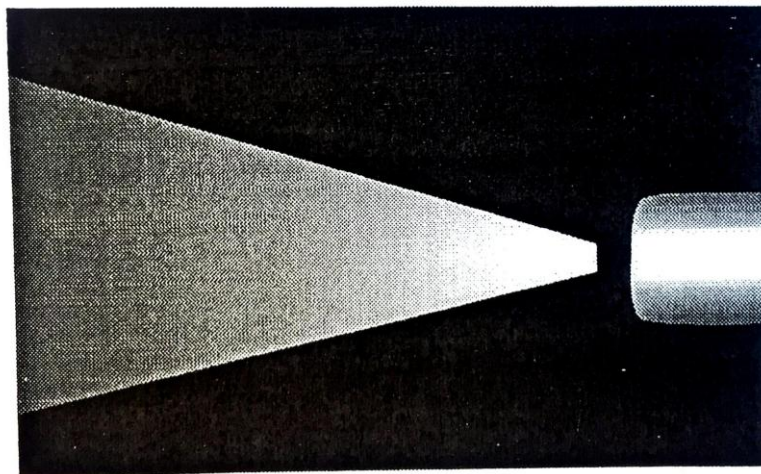


Slika 2-7. Izlazni mlaz na Leach-Walker mlaznici pri tlaku od 0,4 MPa (Dickinson et al., 1992b)

Slika 2-8 prikazuje konusnu mlaznicu Leach-Walker s dva stupnja povijenosti krilaca. Iz slike je vidljivo da različita povijenost krilaca u konusnoj mlaznici utječe na konusni oblik mlaza.



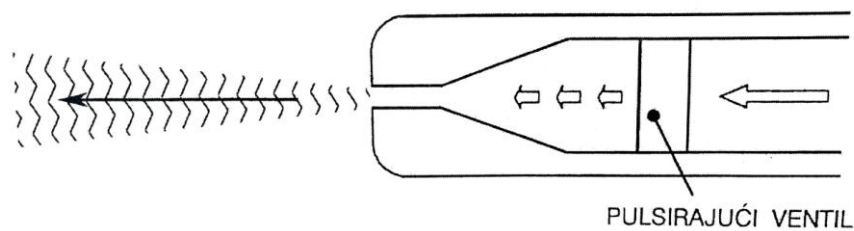
14° Konusna mlaznica pri tlaku 0,4 MPa



30° Konusna mlaznica pri tlaku 0,4 MPa

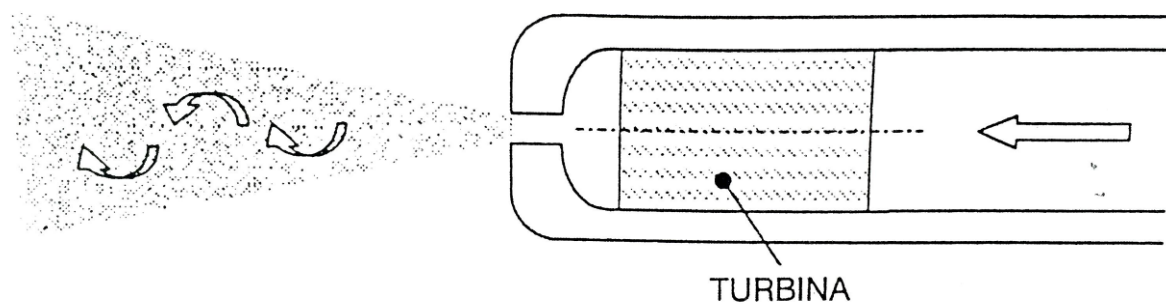
Slika 2-8. Konusne mlaznice s kutom povijenosti krilaca 14° i 30° te rezultirajući izlazni mlaz (Dickinson et al., 1992b)

Pulsirajuća mlaznica tipa Intermittent, djeluje kao čekić, odnosno proizvodi jednoliko ritmičko isprekidani mlaz fluida na stijenu. U svojoj konstrukciji ovaj tip mlaznice ima pulsirajući ventil. Njen mehanizam još se naziva i “tlak vodenog čekića” (Kovačević, 2004) (slika 2-9)



Slika 2-9. Pulsirajuća mlaznica tipa Intermittent (Kovačević, 2004)

Rotirajuća mlaznica tipa Rotary djeluje pomoću turbine. Ona omogućuje istovremenu kombinaciju mlaza velike brzine i rotiranja kapljevine (Kovačević, 2004) (slika 2-10).



Slika 2-10. Rotirajuća mlaznica tipa Rotary (Kovačević, 2004)

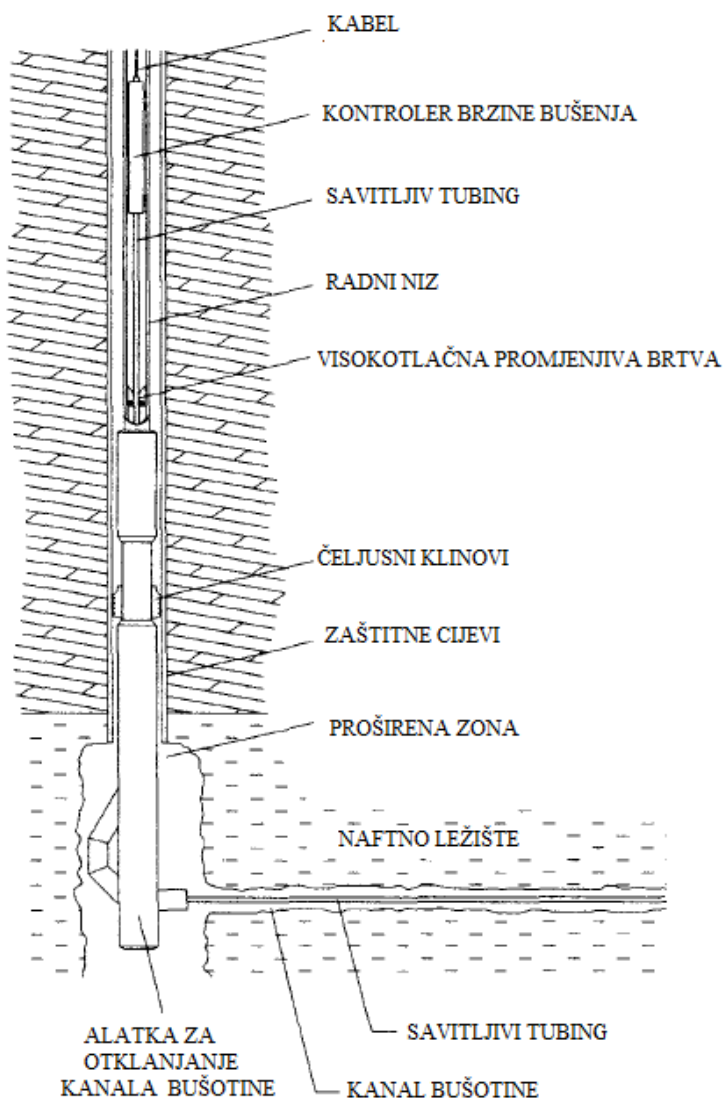
2.3. Isplaka

Isplaka se pod visokim tlakom protiskuje kroz savitljivi tubing do mlaznica. U većini slučajeva fluid koji se koristi je voda. Voda predstavlja jeftin, vrlo dostupan fluid koji ne predstavlja opasnost zagađenju okoliša, međutim u ležištima koja su osjetljiva na vodu kao bušaći fluid koristiti se dizel (Cinelli i Kamel, 2013). Fluid na bazi dizela također ima svojstva otapala, što može biti korisno u ležištima sa težim ugljikovodicima na način da pridonosi brzini bušenja otapajući parafine u formaciji te ne stvarajući pritom emulzije kao što je to slučaj kod upotrebe vode. U karbonatnim ležištima, klorovodična kiselina predstavlja vrlo koristan bušaći fluid koji kombinira pozitivne efekte tlaka te otapanja zbog djelovanja same kiseline na ležišne stijene. Konačno, pojavljuje se abrazivnost kao efekt gdje se kombinira visoki tlak vode te abrazivna svojstva čestica koja su dodana u vodu te je na taj način moguće bušiti zaštitne cijevi i formacija. Korištenje abrazivnih čestica može eliminirati potrebu za zasebnim glodačima zaštitnih cijevi kako bi se probušile zaštitne cijevi.

Viskoznost fluida koji se koristi može dosezati vrijednost i do 20×10^{-3} Pa·s i po vrijednostima je slična isplaci na bazi ulja. Brzina mlaza fluida iznosi od 240 m/s do 270 m/s pri radnom tlaku od 1 000 bar, a ponegdje i većem. Brzina bušenja ovisi o naslagama koje se buše. Kod plitkih nekonsolidiranih naslaga ona iznosi od 1,52 do 30,48 m/min, dok se brzina bušenja u tvrdim pješčenjacima i karbonatima kreće u rasponu od 0,62 do 1,52 m/min (Cinelli i Kamel, 2013).

3. PODZEMNA OPREMA ZA BUŠENJE MLAZOM FLUIDA

Izrada lateralnih (horizontalnih) dionica kanala kod mlaznog bušenja bušotine postiže se razrušavanjem stijene mlazom fluida. Da bi se to postiglo koristi se odgovarajuća oprema za ultrakratki radius skretanja iz vertikalnog u horizontalni dio i najčešće se koristi kod raskrivanja ležišta relativno male debljine. Oprema koja se koristi mora izdržati tlak od 1000 bara. Shematski prikaz podzemne opreme prikazan je na slici 3-1.



Slika 3-1. Bušotina s ultrakratkim radiusom zakrivljenja (Dickinson et al., 1992a)

3.1. Alatka za otklanjanje kanala bušotine

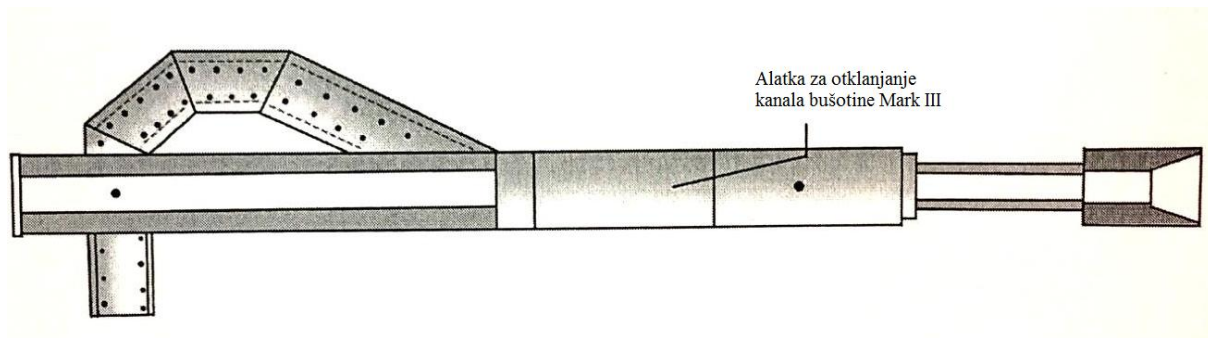
Alatka za otklanjanje kanala bušotine (klin) izgleda kao dvostruko zakrivljen obrnuti upitnik. Postavlja se u proširenu zonu kana bušotine promjera 0,61 m (24") i duljine oko 2,5 m. Proširivanje zone na mjestu postavljanja klina postiže se mehaničkim alatkama. Otklonski klin se u bušotinu orijentira pomoću žiroskopa na željeni azimut te se nakon toga aktivira najčešće nasjedanjem na dno od 10 do 15 tona (Kovačević, 2004). Nakon aktiviranja klina provjerava se da li je postignut projektom predviđeni azimut laterale. Ukoliko je postignut predviđeni azimuth laterale ispituje se hermetičnost bušačeg niza ugradnjom čepa u bušači niz. Nakon vađenja čepa, spušta se vadviva brtva na kabelu pomoću alatki za ugradnju. Maksimalna brzina spuštanja vadvive brtve je 30 m/min. Zatim se vadi alatka za ugradnju iz bušotine i kompletira bušači niz odgovarajućeg promjera s konusnom mlaznicom te brtvenim sklopom (Kovačević, 2004).

Otklonski klin se sidri na dva načina. Sidrenjem pod nategom u koloni zaštitnih cijevi pomoću čeljusti, neposredno iznad proširene zone ili tako da se osloni na dno bušotine pri čemu dolazi i do aktiviranja klina (nasjedanjem). Otklonski klin sadržava klizne i rotirajuće vijke koji usmjeravaju savitljivi tubing iz vertikalnog u horizontalni položaj.

Postoje nekoliko tipova otklonskih klinova. Tip klina koji će se koristiti ovisi o promjeru kanala bušotine u područje skretanja (proširena zona), minimalnoj duljini proširene zone, broju laterala koje će se izraditi te konstrukciji samog otklonskog klina.

Danas se najčešće koristi otklonski klin Mark III (Kovačević, 2004), koji je upotrebljen u svjetskoj praksi nekoliko tisuća puta. Da bi se koristio otklonski klin Mark III promjer kanala bušotine mora biti minimalno 0,1778 m (7"), minimalni promjer kanala bušotine u zoni skretanja 0,6096m (24") te minimalna duljina proširene zone debljine 2,13 m (Kovačević, 2004).

Slika 3-2. prikazuje aktiviran otklonski klin Mark III



Slika 3-2. Alatka za otklanjanje kanala bušotine (klin) Mark III i usmjeravanje alata u položaj za bušenje (Kovačević, 2004)

3.2. Sklop za reguliranje brzine bušenja

Sklop za reguliranje brzine bušenja kontrolira samu brzinu bušenja. Uređaj je smješten unutar kućišta za kontrolu brzine bušenja i nalazi se u vertikalnom dijelu kanala bušotine. Sastoji se od sklopa brtvila i kapilare (termin kojim se označavaju cjevčice s otvorima tako malog promjera da mogu zadržavati fluide kapilarnim djelovanjem) odgovarajuće duljine. Brzina bušenja laterale određena je količinom fluida koji prolazi kroz kapilarnu cjevčicu. Duljina i promjer kapilare određen je eksperimentalno i iskustveno (Kovačević, 2004).

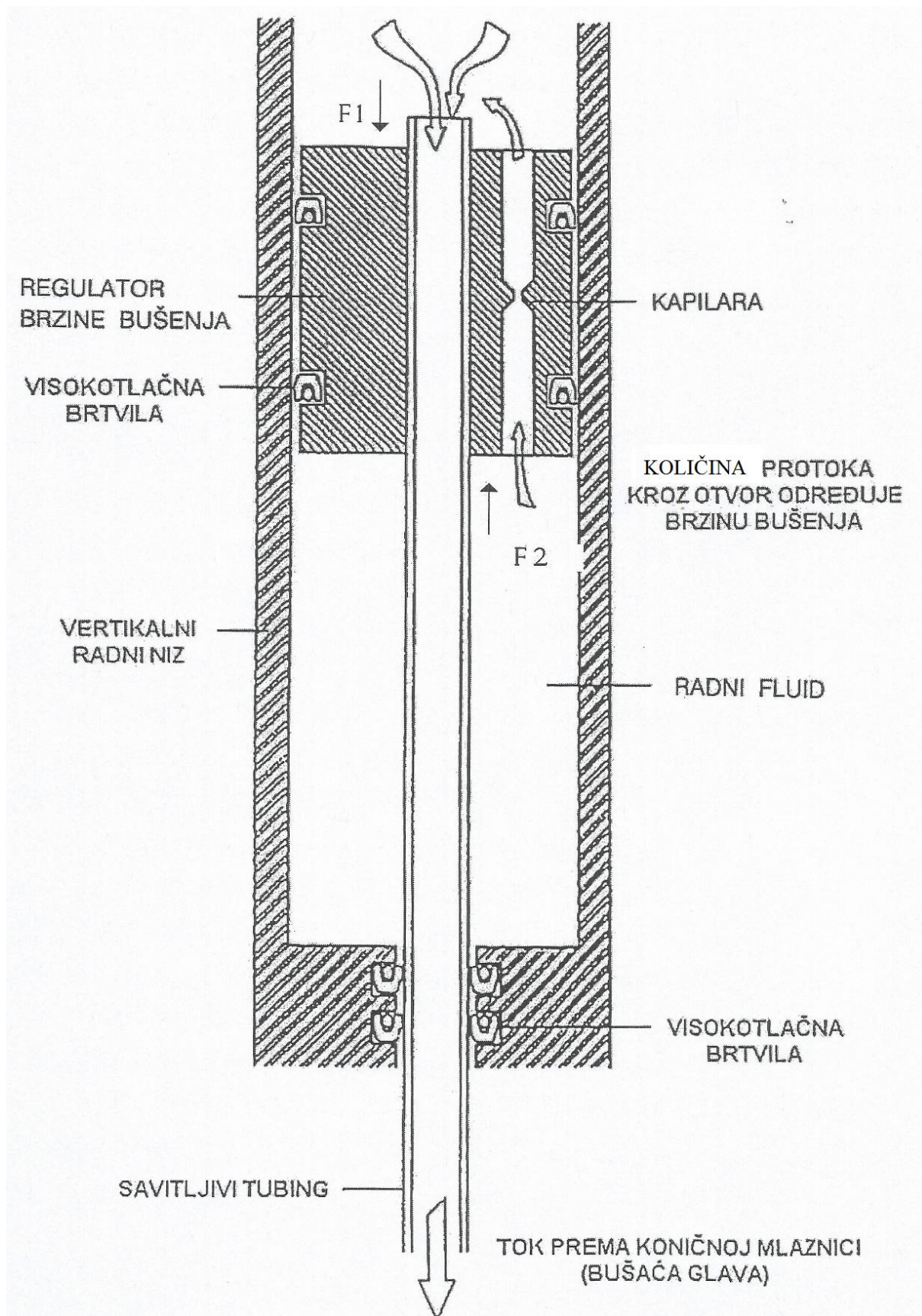
U suštini, to je klip s vanjskim brtvenim elementima koji klize zajedno posebnim, glatkim dijelom vertikalnog niza bušaćeg alata. Voda koja se nalazi pod visokim tlakom, potiskuje gornji dio regulatora odnosno vodu zarobljenu između njega i visokotlačnog brtvenog elementa koji se nalazi na dnu niza bušaćeg alata. Voda može prolaziti jedino kroz centralni otvor koji se nalazi u kućištu za reguliranje brzine bušenja. Rezultat je hidrauličko ograničavanje (ograničava da se ne prijeđe maksimalna dopuštena vrijednost) (Dickinson et al., 1989).

Prilikom ulaska donjeg dijela sklopa u kućište, bušaći niz dobiva brzinu potrebnu za prolaz kroz izbačeni klin. Kada dođe do ulaska gornjeg dijela sklopa u kućište, započinje bušenje. Gornji dio je spojen na električni kabel.

3.3. Kućište uređaja za kontrolu brzine bušenja

U kućište uređaja za kontrolu brzine bušenja ulazi sklop za reguliranje brzine bušenja. Izrađen je od cijevi koje su specijalno obrađene za osiguranje brtvljenja s navojnim spojevima predviđenim za radni tlak do 1 260 bar (Dickinson et al., 1989).

Na slici 3-3 prikazano je kućište uređaja za kontrolu brzine bušenja.



Slika 3-3. Kućište uređaja za kontrolu brzine bušenja (Dickinson et al., 1989)

3.4. Radni i bušaći niz

Na samom dnu radnog niza nalazi se fiksno vezana alatka za otklanjanje kanala bušotine. Radni niz ostaje u bušotini tijekom bušenja, a kroz njega se spušta bušaći niz. Kroz prstenasti prostor između radnog i bušaćeg niza prolazi prema gore radni fluid koji služi kako bi iznio nabušene čestice iz kanala bušotine. Radni niz mora biti odgovarajuće kvalitete prema API standardima te mora izdržati tlakove do 1260 bar (Kovačević, 2004).

Bušaći niz pak služi za izvođenje mlaznog bušenja. On se sastoji od savitljivog tubinga određenog promjera, duljine koja ovisi o duljini laterale, određene kvalitete materijala te sposobnosti da izdrži radni tlak do 1260 bar. Na gornjem kraju savitljivog tubinga postavljen je brtveni sklop te uređaj za reguliranje brzine bušenja opremljen kapilarnom odgovarajuće duljine. Na donjem kraju savitljivog tubinga zavaruje se konusna mlaznica otvora promjera od 0,0254 m do 0,0508 m (1-2"). Cijeli sklop ugrađuje se na žici u kućište uređaja za reguliranje brzine bušenja.

3.5. Konusna mlaznica

Konusna mlaznica zavarena je na donji kraj savitljivog tubing. Kao što je to ranije navedeno, postoje različiti tipovi konusnih mlaznica, ovisno o vrsti formacije koja se buši, željenoj brzini mlaza, potrebi za rotiranjem kapljevine, slojnom tlaku, promjeru kanala itd. Svaki tip mlaznice uvjetuje različito kretanje fluida i na taj način drugačije djeluje na stijenu i njeno samo bušenje. Konusne mlaznice moraju izdržati velika radna naprezanja, radne tlakove preko 1000 bar te smanjenje tlaka na samoj mlaznici od preko 400 bar.

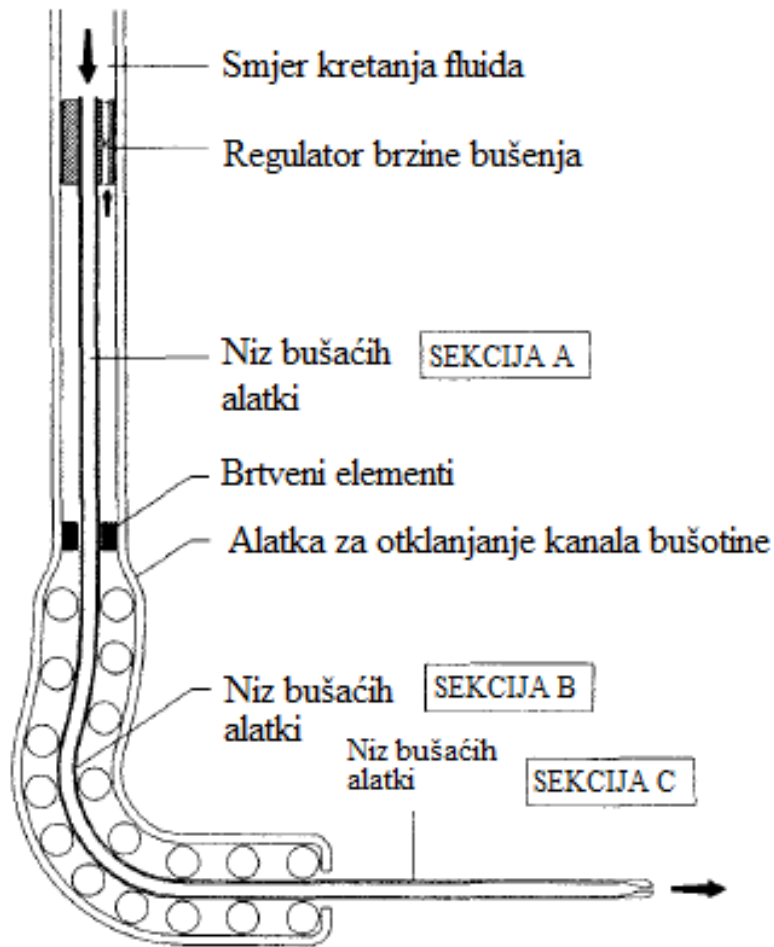
Najčešće korištene mlaznice su Buckmanova konusna mlaznica, konusna mlaznica Leach-Walker, pulsirajuća mlaznica Intermittent, konusna mlaznica sa krilcima Vortex i rotirajuća mlaznica Rotary (Kovačević, 2004).

3.6. Promjenjiva visokotlačna brtvenica

Brtvenica se nalazi unutar radnog niza. Njen posao je da odvoji fluid pod tlakom u radnom nizu od fluida pod slojnim tlakom, odnosno ona sprječava gubitak fluida u sloj. (Kovačević, 2004).

3.6.1. Djelovanje sila na bušaće alatke

Slika 3-4 prikazuje opterećenja na niz bušaćih alatki koja proizlaze iz propulzije i ograničavajućih sila. Prilikom prolaska kroz alatku za otklanjanje kanala bušotine na niz bušaćih alatki djeluju aksijalne sile, unutarnji tlak te sila savijanja. U vertikalnom dijelu kanala bušotine A (iznad visokotlačnog elementa brtvljenja, sekcija A na slici 3-4) sile koje djeluju su uzrokovane naprezanjem ispod granice elastičnosti. U zakrivljenom dijelu kanala bušotine (sekcija B), gdje se niz bušaćih alatki nalazi ispod visokotlačnog elemenata brtvljenja te unutar klina za usmjeravanje bušotine, sile koje djeluju na niz bušaćih alatki uzrokuju naprezanje koje prelazi granicu elastičnosti te se u tom području niz deformira plastično. Međutim zbog djelovanja unutarnjeg tlaka, te postojanja ograničavajućih valjaka unutar klina, ne dolazi do izvijanja niza. U dijelu kanala bušotine (sekcija označena sa C), niz bušaćih alatki izlazi iz klina horizontalno. Tamo se nalazi samo pod utjecajem aksijalne sile te unutarnjeg tlaka. I u ovom području naprezanja sile su ispod granica elastičnosti. Tlak fluida pogoni cjelokupni sustav te omogućava prodiranje alatki kroz formaciju u horizontalnom smjeru. Kako bi se moglo prodirati kroz formaciju, fluid se utiskuje kroz mlaznicu dljeteta konusnog oblika, čime se stvara mlaz brzine od 244 do 274 m/s (Dickinson et al., 1989).



SEKCIJA A Naprezanje u bušaćem nizu ispod granice elastičnosti

SEKCIJA B Naprezanje u bušaćem nizu iznad granice elastičnosti

SEKCIJA C Naprezanje u bušaćem nizu ispod granice elastičnosti

Slika 3-4. Djelovanje sile na niz bušaćih cijevi (Dickinson et al., 1989)

4. PRIPREMA BUŠOTINE ZA IZRADU LATERALA

Na samom početku, potrebno je ugušiti bušotinu odgovarajućim fluidom te demontirati erupcijski uređaj na ušću bušotine. Zatim je potrebno montirati odgovarajući preventerski sklop na ušće bušotine. Nakon što je to napravljeno sljedeći zadatak je provjera nezacementiranog dijela kolone zaštitnih cijevi nategom pomoću alatke ugrađene u kolonu zaštitnih cijevi. Kolona se reže do dubine određene nategom te se taj odrezani dio izvlači iz bušotine.

Nakon rezanja i vađenja kolone iz bušotine postavlja se cementni most na predviđeno mjesto. Nakon stvrdnjavanja cementne kaše pristupa se poravnanju vrha cementnog kamena (mosta) do dubine koja je određena za skretanje novog kanala bušotine. Za pretpostaviti da će biti ugrađen klin za skretanje glodača. Pomoću glodača zasjeca se novi kanal određenog promjera pri čemu se pažljivo kontrolira azimut kako bi se izbjegla njegova nagla promjena. Zatim se pripremi alat za proširenje kanala bušotine na određeni promjer. Elektrokarotažnim mjerenjem određuje se točna dubina slojeva gdje će se izraditi laterale.

Na ušće bušotine postavlja se bušotinska glava i ugrađuje proizvodna kolona iznad proširenog intervala koja se zacementira do planirane dubine. Nakon toga obušuje se peta kolone i dio cementnog kamena iznad proširenog intervala do dna bušotine. Pročišćava se prošireni dio kanala bušotine te se zamjenjuje isplaka odgovarajućim fluidom. Nakon svih ovih operacija sljedi kompletiranje otklonskog klina sa sidrom i kućištem za reguliranje brzine bušenja, te se na radnom nizu tubing spušta do predviđene dubine nakon čega se usmjerava otklonski klin.

Sljedeće je navrtanje brtvene glave na radni niz te ugradnja na kabelu bušaćeg niza s brtvenim sklopom u kućište za reguliranje brzine bušenja. Nakon ugradnje dubinske opreme započinje montaža i spajanje nadzemne opreme.

4.1. Nadzemna oprema

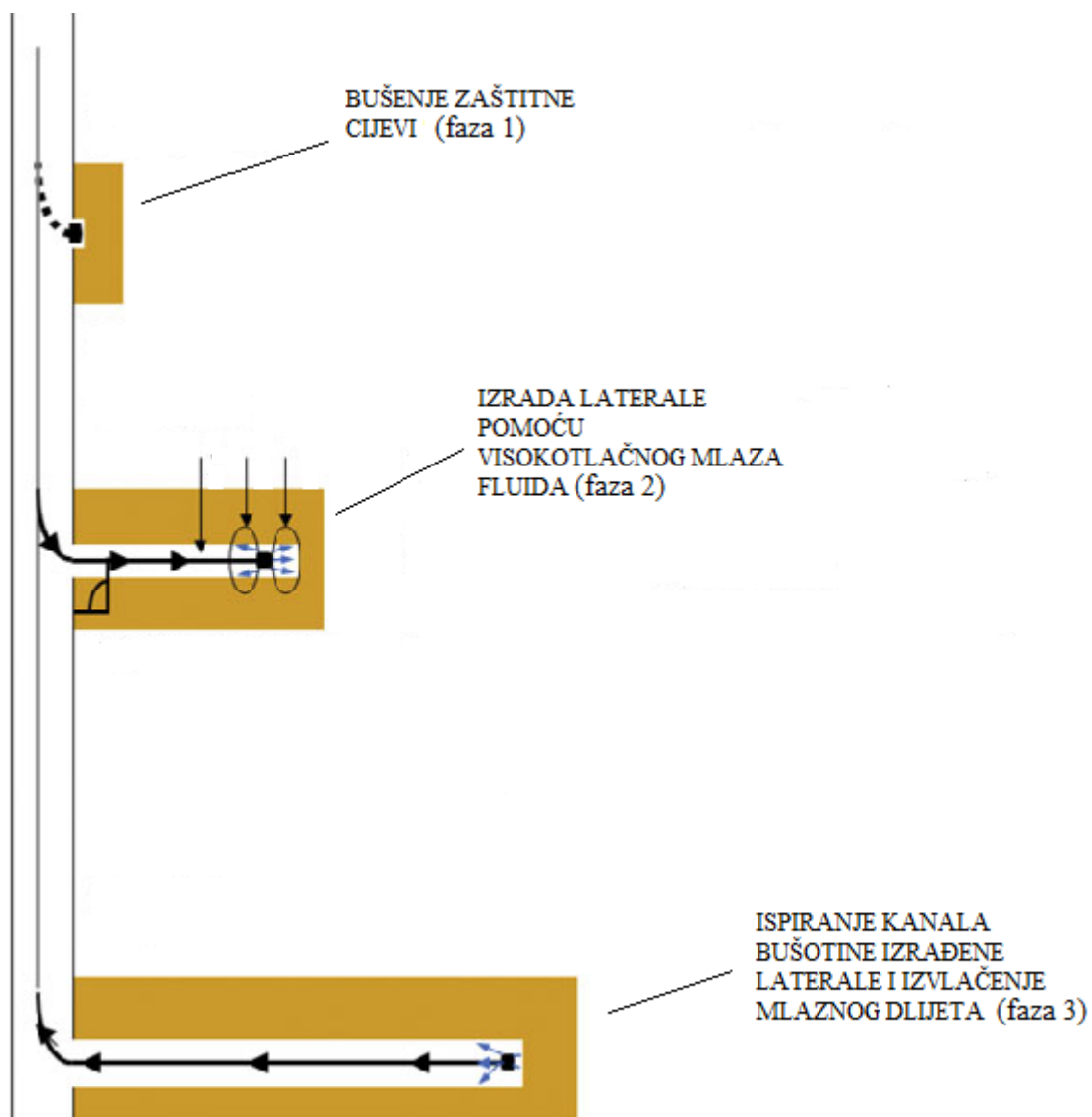
Nadzemna oprema kod mlaznog bušenja obuhvaća (Kovačević, 2004):

- bušaću garnituru s isplačnim sustavom,
- rezervoarski prostor,
- visokotlačne pumpe,
- centrifugalne pumpe,
- tlačne vodove,
- sigurnosne ventile,
- protupovratne ventile,
- senzore tlaka,
- ventile određenog promjera.

Razvodnik (usmjerava tok fluida propuštanjem, zatvaranjem, promjerom smjera toka) se spaja na zadnju cijev radnog niza i priključcima na lubrikator (privremeni sklop cijevi i ventila na ušću bušotine koji se primjenjuje kada se u bušotini upumpava isplaka veće gustoće radi kontrole nenormalnog slojnog tlaka u bušotini) i visokotlačne vodove radnih sisaljki. Zatim se ispituju površinski tlačni vodovi zatvaranjem ventila na razvodniku. Bušenje počinje pokretanjem visokotlačnih sisaljki uz protok i tlak dok se brzina bušenja određuje tijekom samog procesa.

Pomoću elektrokarotažne jedinice na monitoru prati se napredak bušenja, tlak i protok. Nakon što se doseгла predviđena duljina laterale nastavlja se cirkulacija 10 minuta kako bi se iznjеле sve krhotine iz bušotine. Zatim se otpaja brtvena glava te se spušta uteg za otpajanje kabela od bušaćeg niza. Poslije vađenja kabela spušta se inklinometar i vodilica na kابلu te se mjeri otklon laterale od vertikale. Inklinometar nasjeda na vrh sklopa za reguliranje brzine bušenja, lagano se potiskuje inklinometar do izlaza iz klina i počinje mjerenje koje se obavlja svakih pola metra. Po završetku mjerenja, inklinometar se na elektrokarotažnom kابلu vadi iz bušotine.

Na slici 4-1 prikazana je izrada laterale u tri faze. Prvo se buši (glođe) zaštitna cijev (otvara se bočni prozor, faza 1), zatim se izrađuje laterala visokotlačnim mlazom (faza 2) te u završnoj fazi se ispire kanala bušotine izvlači savitljivi tubing s mlaznicom iz bušotine.



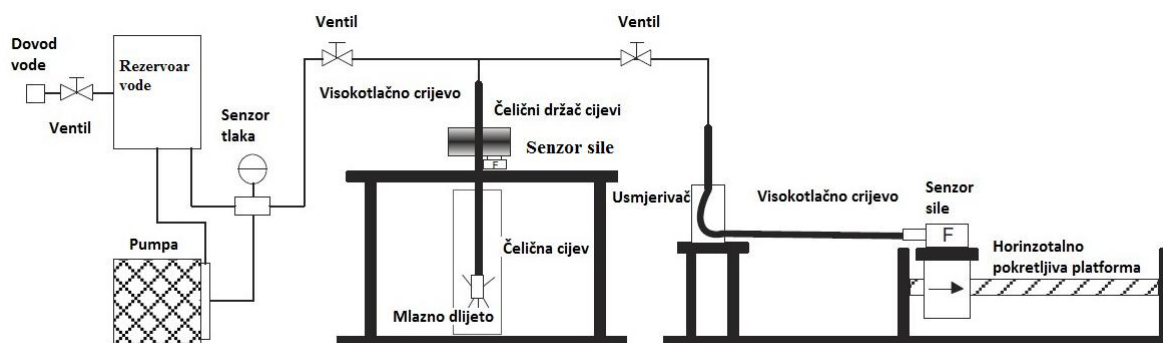
Slika 4-1. Tri faze izrade laterale (Buckman Jet Drilling, 2003)

5. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Eksperimentalno istraživanje koje će biti objašnjeno u nastavku teksta provedeno je u Kini, a dobiveni rezultati primjenjeni su u praksi. Pogreška modela bila je unutar 8% te se može reći da eksperimentalni proračuni odgovarali mjerenjima dobivenim na terenu.

Eksperimentalna istraživanja vrše se kako bi se testirala oprema za mlazno bušenje prije same uporabe u bušotini. Gang i suradnici (2013) izvršili su eksperimentalna istraživanja te dali teoretske osnove za hidraulički proračun, dok su Li i suradnici (2015) predložili eksperimentalnu shemu za mjerenje sile izbacivanja visokotlačnog crijeva (Gang et al., 2013).

Eksperimentalni sustav (slika 5-1) sastajao se od testnog modula za mjerenje sile izbacivanja visokotlačnog crijeva, modula za mjerenje sile rastezanja, opreme za mješanje i utiskivanje fluida te sustava za prikupljanje informacija. Testni modul sile izbacivanja fluida sastojao se od visokotlačnog crijeva, mlaznog dlijeta te senzora sile. Modul sile rastezanja sastojao se od visokotlačnog crijeva, usmjerivača, horizontalno pokretne platforme te senzora sile. Testni fluidi (voda) uskladištena je u spremniku za vodu dok se sustav pumpi sastojao se od trostrukih pumpi. Niz senzora sile i ventili korišteni su za mjerenje i kontrolu protoka te tlakova u testnim modulima. Senzori sile korišteni su u mjerenjima sile izbacivanja te sile rastezanja. U tablici 5-1 dane su karakteristike mlaznih dlijeta, visokotlačnih crijeva i usmjerivača.



Slika 5-1. Shematski prikaz eksperimentalnog sustava za istraživanje mogućnosti razrušavanja stijene mlazom fluida (Bin et al., 2016)

Tablica 5-1. Karakteristike pojedinih djelova eksperimentalne opreme za ispitivanje tehnologije mlaznog bušenja (Bin et al., 2016)

Visokotlačno crijevo	Duljina (m)		Vanjski promjer (mm)	Unutarnji promjer (mm)	Jedinična masa umanjena zbog sile uzgona ($N \cdot mm^{-1}$)		Unutarnji tlak rasprskavanja (MPa)	
	100		14	9	961		40	
Mlazno dlijeto	n_f (kom)	n_c (kom)	n_b (kom)	d_f (mm)	d_c (mm)	d_b (mm)	θ_f (°)	θ_b (°)
	5	1	9	0,7	0,7	0,9	12	30
Savitljiv tubing	Duljina (m)		Vanjski promjer (mm)	Unutarnji promjer (mm)	Promjer koluta (mm)		Unutarnji tlak rasprskavanja (MPa)	
	4000		38	31	1828		83	
Usmjerivač	Promjer (mm)		Duljina (mm)	Radijus zakretanja (mm)	Promjer zaštitnih cijevi (mm)		-	
	118		400	90	140		-	

Oznake dane u tablici:

n_f - broj prednjih mlaznica mlaznog dlijeta

n_c - broj prednjih centralnih mlaznica mlaznog dlijeta

n_b - broj stražnjih mlaznica mlaznog dlijeta

d_f - promjer prednjih mlaznica, mm

d_c - promjer prednjih centralnih mlaznica mlaznog dlijeta, mm

d_b - promjer stražnjih mlaznica mlaznog dlijeta, mm

θ_f - difuzijski kut prednjih mlaznica, °

θ_b - difuzijski kut stražnjih mlaznica, °

5.1. Postupak ispitivanja sile izbacivanja

Postupak za mjerenje sile izbacivanja visokotlačnog crijeva predložili su Li i suradnici u svom radu iz 2015. godine (Bin et al., 2016). Visokotlačno crijevo spojeno je s mlaznim dlijetom te postavljeno u čeličnu cijev. Senzor sile bio je fiksiran za testnu platformu. Crijevo se učvrstilo pomoću čeličnog držača te je čelični držač postavljen na senzor sile kako bi se izmjerila sila izbacivanja. Nakon postavljanja uređaja utiskivao se fluid pri raznim protocima te se mjeri sila izbacivanja. U nastavku ispitivanju uklonjeno je mlazno dlijeto kako bi se izmjerilo smanjenje tlaka na mlaznom dlijetu te smanjenje tlaka u visokotlačnom crijevu. Konstantan protok održavan je u trajanju od tri minute za svako ispitivanje (Bin et al., 2016).

Slika 5-2 prikazuje mlazno dlijeto, usmjerivač i visokotlačno crijevo korišteno u laboratorijskim istraživanjima.



Slika 5-2. Mlazno dlijeto (a), usmjerivač (b) i visokotlačno crijevo (c) (Bin et al., 2016)

5.2. Postupak ispitivanja sile rastezanja

Usmjerivač i senzor sile postavljeni su na testnu platformu. Jedan kraj visokotlačnog crijeva bio je spojen na pumpu, dok je drugi kraj bio provučen kroz usmjerivač te spojen na senzor sile. Nakon toga utiskivan je fluid pri različitim protocima pri čemu su ostvarene različite brzine protjecanja. Kada se protok stabilizirao, pokretna testna platforma počela se kretati brzinom od 0,0055 m/s, tijekom čega su zabilježeni tlakovi te otpori. Konstantan protok održavan je u trajanju od tri minute za svaki eksperiment. Vršna sila rastezanja zabilježena je u svakom testu na usmjerivaču.

5.3. Optimizacije hidrauličkog sustava

Za razliku od konvencionalnog bušenja, kod mlaznog bušenja najčešći bušaći fluid je voda, a protoci i promjer savitljivog tubinga i visokotlačnog crijeva su manji nego kod alatki za konvencionalno bušenje. U nastavku teksta bit će prikazan pojednostavljen model smanjenja tlaka izveden na temelju sljedeće tri pretpostavke:

- a) prema proračunima utvrđeno je da utjecaj stlačivosti vode na smanjenje tlaka bio je minimalan. Kako bi se pojednostavilo proračun, pretpostavljeno je da bušaći fluid nestlačiv. Bušaći fluid (voda) ima gustoću 1000 kg/m^3 te viskoznost od $1,005 \text{ mPa}\cdot\text{s}$;
- b) najčešće se koristi promjer savitljivog tubinga $0,0381 \text{ mm}$ ($1 \frac{1}{2} \text{ in}$) ili $0,0254 \text{ mm}$ (1 in) zbog visokog tlaka koji se postiže u terenskim uvjetima. Prema proračunima, protok fluida uvijek je turbulentan u visokotlačnom crijevu i savitljivom tubingu;
- c) kod mlaznog bušenja protoci su manji od onih postignutih ili primjenjenih u konvencionalnom bušenju. Prema proračunima za bušotinu određenih karakteristika koja je uzeta za primjer, smanjenje tlaka u prstenastom prostoru je malo i iznosi samo $0,0087 \text{ MPa}$. Kako bi se pojednostavio izračun, pretpostavljeno je da je smanjenje tlaka u prstenastom prostoru zanemarivo.

Tlak utiskivanja kod mlaznog bušenja može se izračunati prema sljedećoj formuli (Bin et al., 2016):

$$\Delta p_L = \Delta p_{cT} + \Delta p_{sT} + \Delta p_h + \Delta p_b \quad (5-1)$$

Gdje su:

Δp_L - tlak utiskivanja, MPa

Δp_{cT} - pad tlaka u spiralnoj sekciji savitljivog tubinga, Pa

Δp_{sT} - pad tlaka u horizontalnoj sekciji savitljivog tubinga, Pa

Δp_h - pad tlaka u visokotlačnom crijevu, Pa

Δp_b - pad tlaka u mlaznom dlijetu, Pa

Smanjenje tlaka u savitljivom tubingu moguće je izračunati prema sljedećem izrazu (Bin et al., 2016):

$$\Delta p_i = \frac{2 \cdot f \cdot \rho \cdot L \cdot v^2}{d_i} \quad (5-2)$$

Gdje su:

Δp_i - pad tlaka u savitljivom tubingu, Pa

f - Fanningov faktor trenja (bezdimezionalan)

ρ - gustoća fluida, kg/m³

v - brzina fluida, m/s

L - duljina cijevi, m

d_i - unutarnji promjer cijevi, m

Zhu i Shah (2004.) te Shah i Ahmed Kamel (2010.) su na temelju eksperimenta predložili Fanningov faktor trenja za turbulenti protok Newtonovog fluida u savitljivom tubingu. Uvrštavanjem koeficijenta f_{ct} i f_{st} u jednadžbu 5-2, pad tlaka u zakrivljenom Δp_{cT} i ravnom Δp_{sT} dijelu savitljivog tubinga može se prikazati kao (Bin et al., 2016):

$$\Delta p_{ct} = \frac{0,218 \cdot \rho^{1,05} \cdot L_{cT}}{d^{4,95} \cdot \mu^{0,05} \cdot D^{0,1} \cdot \left\{ \log \left[\frac{\Delta}{3,7065 \cdot d} - \frac{3,9625 \cdot \mu \cdot d}{\rho \cdot Q} \cdot \log \left(\frac{1}{2,8570} \cdot \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{1,1098} + 4,7096 \cdot \left(\frac{\mu \cdot d}{\rho \cdot Q} \right)^{0,8981} \right) \right] \right\}^2} \cdot Q^{2,05} \quad (5-3)$$

$$\Delta p_{sT} = \frac{0,2026 \cdot \rho \cdot L_{sT}}{d^5 \cdot \left\{ \log \left[\frac{\Delta}{3,7065 \cdot d} - \frac{3,9625 \cdot \mu \cdot d}{\rho \cdot Q} \cdot \log \left(\frac{1}{2,8570} \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{1,1098} + 4,7096 \cdot \left(\frac{\mu \cdot d}{\rho \cdot Q} \right)^{0,8981} \right) \right] \right\}^2} \cdot Q^2 \quad (5-4)$$

Gdje su:

L_{cT} - duljina spiralnog dijela savitljivog tubinga namotanog na bubanj, m

L_{sT} - duljina horizontalnog dijela savitljivog tubinga, m

d - unutarnji promjer savitljivog tubinga, m

D - promjer koluta za namatanje savitljivog tubinga, m

Δ - hrapavost stijenki savitljivog tubinga, m

μ - dinamička viskoznost bušačkog fluida, Pa·s

Q - protok fluida, m³/s

Visokotlačno crijevo sastoji se od vanjskog, srednjeg i unutarnjeg sloja. Vanjski sloj napravljen je od poliuretana, srednji od pletenog čeličnog sloja te unutarnji od poliamida. Poliamid je plastika koja se često koristi u industriji jer je apsolutna hrapavost plastike puno manja od one komercijalnog čelika. Kako bi se pojednostavio izračun izveden je model iz Blasiusove korelacije faktora trenja tako da je uveden korekcijski faktor trenja α . Blasius (1913.) je razvio jednadžbu za Fanningov faktor trenja za turbulentno protjecanje kroz glatku cijev (Bin et al., 2016):

$$f = \frac{0,079}{N_{Re}^{0,25}} \quad (5-5)$$

Gdje je:

N_{Re} - Reynoldsov broj fluida, definiran kao:

$$N_{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} = \frac{4 \cdot \rho \cdot Q}{\pi \cdot \mu \cdot d} \quad (5-6)$$

Uvrštavanjem izraza 5-5 i 5-6 u jednadžbu 5-2 dobiven je sljedeći izraz za izračunavanje smanjenje tlaka u visokotlačnom crijevu:

$$\Delta P_{ss} = 0,2399 \cdot \rho^{0,25} \cdot \frac{L}{d^{4,75}} \cdot Q^{1,75} \quad (5-7)$$

Na temelju jednadžbe 5-7 može se uvesti korekcijski faktor trenja α , tako da se model smanjenja tlaka u visokotlačnom crijeva može prikazati kao:

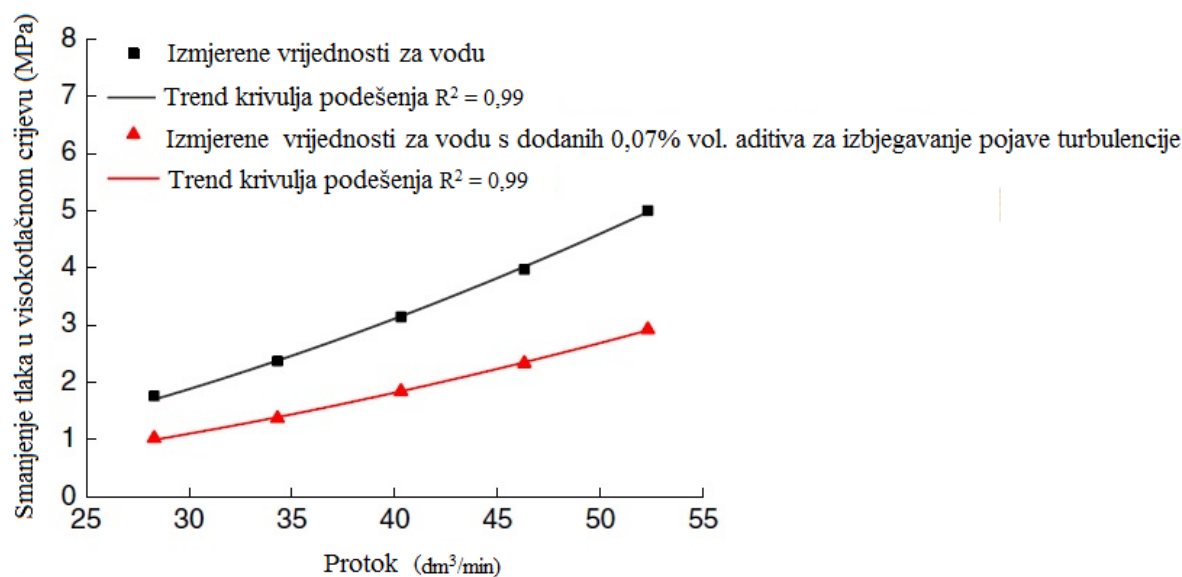
$$\Delta p_h = \alpha \cdot \rho^{0,75} \cdot \mu^{0,25} \cdot \frac{L_h}{d_{hi}^{4,75}} \cdot Q^{1,75} \quad (5-8)$$

Gdje su:

d_{hi} - unutarnji promjer visokotlačnog crijeva, m

L_h = duljina visokotlačnog crijeva, m

Eksperimentalni rezultati za visokotlačno crijevo prikazani su na slici 5-3.



Slika 5-3. Smanjenje tlaka u visokotlačnom crijevu (Bin et al., 2016)

Chen i suradnici (2006.) predložili su model proračuna smanjenja tlaka u mlaznom dlijetu s više mlaznica (Bin et al., 2016):

$$\Delta p_b = \frac{0,5136 \cdot \rho \cdot Q^2}{C^2 \cdot A^2 \cdot 1000^2} \quad (5-9)$$

Gdje su:

ρ - gustoća fluida kg/m^3

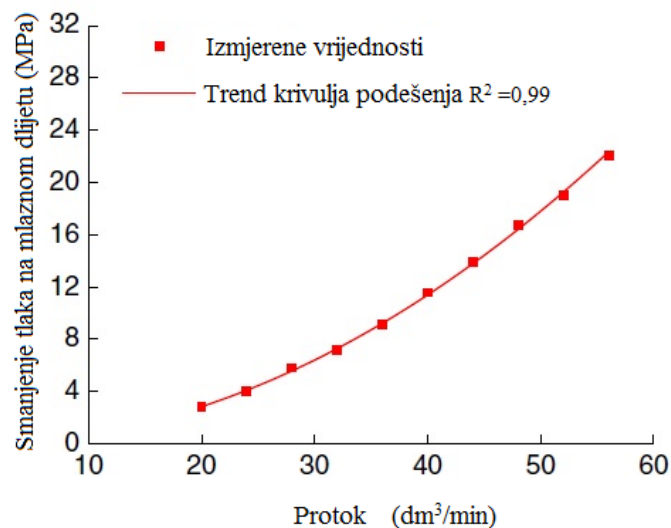
C - koeficijent izbacivanja mlaznog dlijeta, (bezdimenzionalan)

A - ukupna površina mlaznica, m^2

Q - brzina protjecanja, m^3/s

Za određeni tip mlaznog dlijeta i poznati testni fluid, koeficijent C je jedina nepoznanica u jednadžbi 5-9. On se može odrediti uvrstivši eksperimentalne podatke pada tlaka i brzine protoka u jednadžbu 5-9. Na taj način moguće je upotrebom modela odrediti smanjenje tlaka u mlaznom dlijetu.

Slika 5-4 prikazuje eksperimentalne rezultate za mlazno dlijeto korišteno u bušotini (podaci o mlaznom dlijetu prikazani su u tablici 5-1 koja je prikazana ranije u radu).



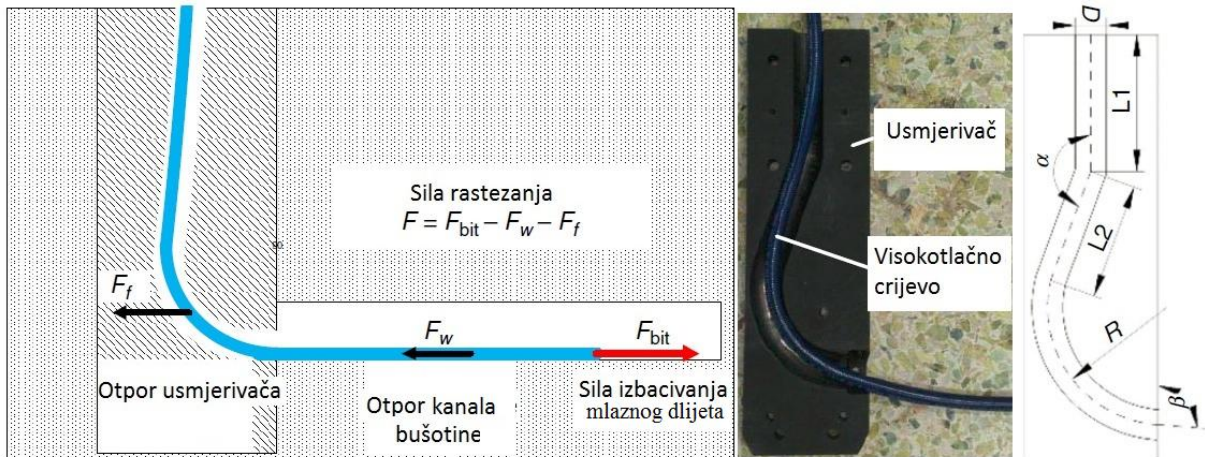
Slika 5-4. Smanjenje tlaka u mlaznom dlijetu (Bin et al., 2016)

Tijekom bušenja, visokotlačno crijevo nalazi se u fizičkom kontaktu sa stijenkama bušotine i usmjerivačem. Prema analizi sila danoj na slici 5-5, lateralno pružajuća sila sastoji se od: sile izbacivanja mlaznog dlijeta F_{bit} , sile koja je rezultat otpora stijenki bušotine F_w te sile koja je rezultat otpora usmjerivača F_f . Prema tome, lateralno opružujuća sila može biti izračunata kao (Bin et al., 2016):

$$F = F_{bit} - F_r = F_{bit} - F_w - F_f \quad (5-10)$$

Gdje je:

F_r - lateralno pružajući otpor, odnosno sila koja nastaje uslijed kontakta crijeva i stijenci kanala, N



Slika 5-5. Analiza sila tijekom mlaznog bušenja (Bin et al., 2016)

Sila izbacivanja mlaznog dlijeta većinom nastaje kao posljedica razlike momenta sile između prednjih i stražnjih mlaznica. Teoretski model sile izbacivanja za mlazno dlijeto koje se sastoji od više mlaznica prikazan je na slici 5-6. Model je koreliran i potvrđen sa eksperimentalnim rezultatima i numeričkim simulacijama. Sila izbacivanja na mlaznom dlijetu može se izračunati kao:

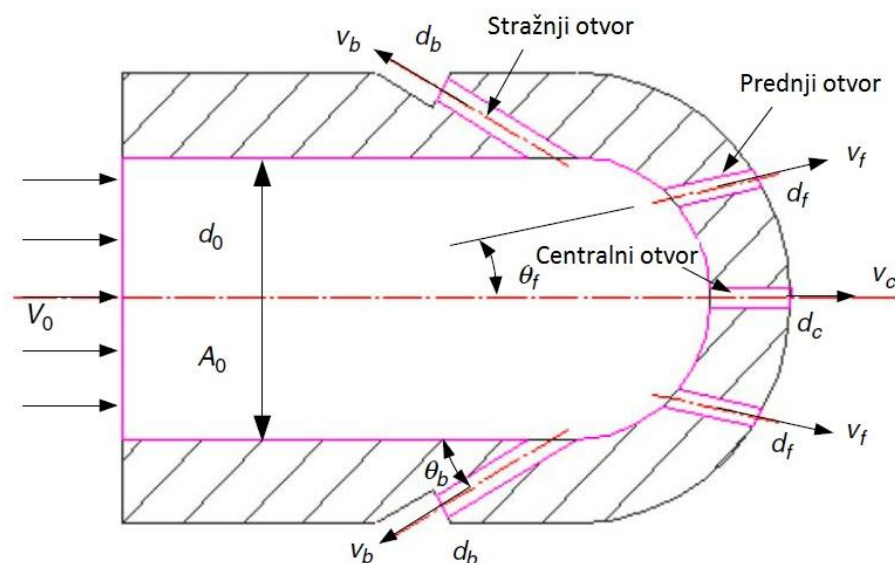
$$F_{bit} = \frac{\rho}{A_0 \cdot 1000^2} \cdot m \cdot Q^2 \cdot \quad (5-11)$$

Gdje su:

A_0 - unutarnja površina poprečnog presjeka mlaznog dlijeta, m^2

Q - protok fluida, kg^3/s

m - koeficijent samopokretanja



Slika 5-6. Samopokrećuće mlazno dlijeto koje se sastoji od više mlaznica (Bin et al., 2016)

Koeficijent samopokretanja može se izračunati prema sljedećem izrazu (Bin et al., 2016):

$$m = \frac{0,081 \cdot A_0^2 \cdot S}{C^2 \cdot d_{ne}^4} \cdot S + 0,5 \cdot (1 + S) - \left(\frac{k}{(n_f + 1) \cdot (k + 1)} \right)^2 D_c^4 \cdot S + n_b \cdot \left(\frac{1}{n_b \cdot (k + 1)} \right)^2 \cdot D_b^2 \cdot \cos \theta_b \quad (5-12)$$

Gdje su \$D_c\$ i \$D_b\$ omjeri promjera mlaznog dlijeta i centralnih i stražnjih mlaznica (bezdimezionalni), koje su definirane kako slijedi (Bin et al., 2016):

$$D_c = \frac{d_o}{d_c} \quad (5-13)$$

$$D_b = \frac{d_o}{d_b} \quad (5-14)$$

Gdje su:

\$d_o\$- unutarnju promjer mlaznog dlijeta, m

\$d_c\$- promjer prednje centralne mlaznice mlaznog dlijeta, m

\$d_b\$- promjer stražnje mlaznice mlaznog dlijeta, m

\$A_0\$ je unutarnja površina poprečnog presjeka mlaznog dlijeta (mm²):

$$A_0 = \frac{\Pi}{4} \cdot d_o^2 \quad (5-15)$$

d_{ne} je ekvivalentni promjer mlaznica (mm), koji se može opisati, za dlijeto sa više mlaznica (Bin et al., 2016) pomoću sljedećeg izraza:

$$d_{ne} = \sqrt{n_f \cdot d_f^2 + n_c \cdot d_c^2 + n_b \cdot d_b^2} \quad (5-16)$$

S je koeficijent područja prednjeg lica mlaznog dlijeta koje se može izračunati kako slijedi (bezdimezionalan) (Bin et al., 2016):

$$S = \left(\frac{1}{D_c^2} + \frac{n_f}{2 \cdot \cos \theta_f \cdot D_c^2} \right) \quad (5-17)$$

Omjer protoka prednjih i stražnjih mlaznica, k je uglavnom povezan sa omjerom površine mlaznica, koji se može odrediti kako slijedi (Bin et al., 2016):

$$k = \frac{n_f \cdot d_f^2 + d_c^2}{\chi \cdot n_b \cdot d_b^2} \quad (5-18)$$

Gdje su:

k - omjer protoka prednjih i stražnjih mlaznica, bezdimezionalan

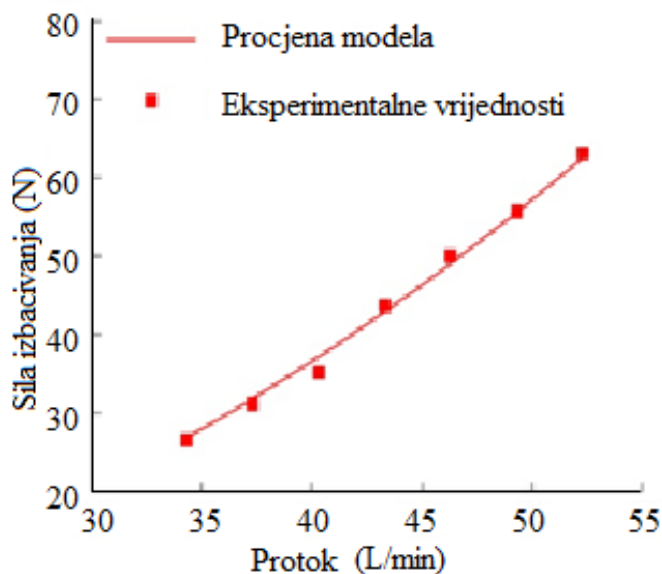
χ - factor stražnjeg protoka mlaznice, bezdimezionalan

U tablici 5-2 prikazan je omjer protoka stražnjih i prednjih mlaznica

Tablica 5-2. Izračunati i izmjereni omjer protoka prednjih i stražnjih mlaznica (Bin et al., 2016)

Promjer	Unutarnji promjer d_2 (m)			Vanjski promjer d_1 (m)	Hidraulički promjer d_e (m)	Hrapavost (m)	Duljina (m)		Protok $L \cdot \text{min}^{-1}$	Smanjenje tlaka (MPa)
Kanal bušotine	0,014			0,4	0,036	0,0003	100		60	0,029
Zaštitne cijevi	0,073			0,121	0,048	0,00001	2300		60	0,058
Mlazno dlijeto br.	n_f	n_c	n_b	d_f (m)	d_c (m)	d_b (m)	Φ_f (°)	Φ_b (°)	Izračunato k	Izmjereno k
1	0	1	6	0,001	0,001	0,001	0	30	0,185	0,185
2	3	1	6	0,001	0,001	0,001	0	30	0,741	0,752
3	3	1	6	0,001	0,001	0,001	0	20	0,741	0,773
4	3	1	6	0,001	0,001	0,001	10	30	0,741	0,740
5	3	1	6	0,001	0,001	0,001	15	30	0,741	0,733
Bušotina A	5	1	9	0,0007	0,0007	0,0009	12	30	0,448	0,430

Za određeni tip mlaznog dlijeta i poznati testni fluid, koeficijent m je jedina nepoznanica u jednadžbi 5-11. Na taj se način može, koristeći ovaj model izračunati silu izbacivanja mlaznog dlijeta na temelju eksperimentalnih podataka. Ukoliko je omjer protoka prednjih i stražnjih mlaznica (k) 0,43 te koeficijent izbacivanja mlaznog dlijeta (C) 0,56, uvrštavanjem u jednadžbu 5-12 dobiva se koeficijent samopokretanja (m) koji iznosi 6,46. Eksperimentalni rezultati prikazani su na slici 5-7 te ukazuje na linearnu povezanost između otpora protjecanja i unutarnjeg tlaka crijeva.



Slika 5-7. Sila izbacivanja mlaznog dlijeta (Bin et al., 2016)

Prema eksperimentalnim rezultatima sila izbacivanja većinom ovisi o protoku i samoj konstrukciji mlaznog dlijeta. Treba se napomenuti da na mlazno dlijeto djeluju određeni utjecaji okoline u terenskim uvjetima poput promjer bušotine, efekt sile podtlaka, te međusobnoj udaljenost mlaznica (*engl. standoff distance*). Prema provedenim računalnim simulacijama vidljivo je da je problem dinamike fluida protoka oko mlaznog dlijeta vrlo kompleksan te je teško definirati teoretski model koji opisuje te dodatne efekte. Stoga su u pojednostavljenom modelu zanemareni ti efekti, odnosno potrebna su dodatna istraživanja tih efekata kako bi se saznali utjecaji na silu izbacivanja (Bin et al., 2016).

Otpor kretanja bušaćeg niza u lateralnom smjeru predstavlja sumu otpora stijenki bušotine i otpora usmjerivača. Ovdje je procjenjen otpor usmjerivača eksperimentalnom

regresijom. Rezultati eksperimenata (slika 5-8) ukazuje linearnu povezanost između otpora i unutarnjeg tlaka crijeva.

Stoga se može jednostavno identificirati korelaciju između unutarnjeg tlaka crijeva i otpora usmjerivača (Bin et al., 2016):

$$F_f = \alpha \cdot \Delta p_{inner} + b \quad (5-19)$$

U terenskim uvjetima, unutarnji tlak visokotlačnog crijeva (Δp_{inner}) povezan je sa smanjenjem tlaka u crijevu (Δp_h) i sa smanjenjem tlaka u mlaznom dlijetu (Δp_b) zbog smanjenja tlaka uslijed trenja (Bin et al., 2016):

$$p_{inner} = \Delta p_h + \Delta p_b \quad (5-20)$$

Uvrštavajući jednadžbu 5-20 u 5-19 dobiva se sljedeći izraz (Bin et al., 2016):

$$F_f = a \cdot (\Delta p_h + \Delta p_b) + b \quad (5-21)$$

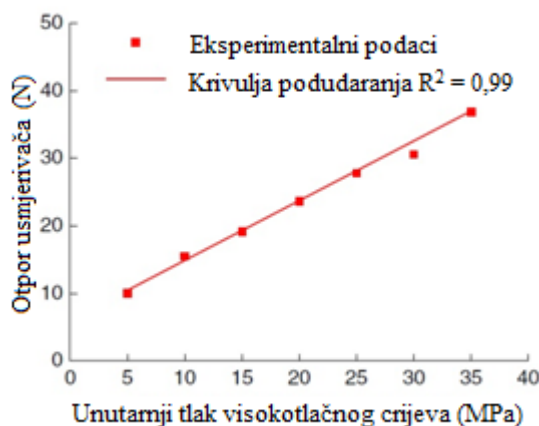
Gdje su a i b korelacijski koeficijenti. Koeficijenti su povezani sa strukturom usmjerivača, materijalom crijeva te promjerom crijeva. Za određeni tip usmjerivača i visokotlačnog crijeva koeficijenti a i b jedine su nepoznate vrijednosti u jednadžbi 5-21. Na temelju eksperimentalnih podataka, može se izvesti linearna funkcija gdje se vrijednosti a i b dobivaju na temelju nagiba linije i vrijednosti odsječka na y osi. Na taj način može se izračunati sila otpora usmjerivača upotrebom ovog modela. Eksperimentalni rezultati za usmjerivač korišteni u ovim eksperimentima dani su i na slici 5-8. Očitane vrijednosti a i b , su iznosile 0,88 i 6,06.

Model otpora produljenja (pružanja) bušačkog niza može biti izražen kako slijedi (Bin et al., 2016):

$$F_r = F_w + F_f = \mu \cdot q_{bh} \cdot L_h + a \cdot (\Delta p_h + \Delta p_b) + b \quad (5-22)$$

Gdje su a i b korelacijski koeficijenti, povezani sa putanjom usmjerivača, materijalom od kojeg je visokotlačno crijevo napravljeno te sa duljinom visokotlačnog crijeva. Upotrebom ranije spomenutog modela može se izračunati otpor usmjerivača.

Slika 5-8 prikazuje otpor usmjerivača dobiven eksperimentalnom regresijom.



Slika 5-8. Otpor usmjerivača (Bin et al., 2016)

5.4. Optimizacije sustava protjecanja radnog fluida

Prema karakteristikama bušaćeg sustava razrušavanje stijena mlazom fluida odvija se pomoću stražnjeg efekta mlaznog dlijeta koje se samo pokreće i pomoću prednje sile visokotlačnog mlaza (slika 2-2).

Kako bi se dlijeto kontinuirano pokretalo prema naprijed, minimalna brzina protjecanja radnog fluida trebala bi zadovoljiti dva uvjeta: sila izbacivanja mlaznog dlijeta F_{bit} trebala bi biti veća od lateralno pružajućeg otpora F_r , te bi smanjenje tlaka na mlaznom dlijetu Δp_b trebalo biti veće od tlaka razrušavanja stijena P_{min} . Za potrebe opisanog eksperimenta pretpostavljen je minimalni tlak za razrušavanje stijene od 15 MPa.

Kako bi se osiguralo razrušavanje stijene, minimalno smanjenje tlaka trebao bi biti veći od tlaka raspucavanja stijena. Mlazno bušenje većinom se koristi u bušenju plitkih, mekih, metanskih ležišta vezanih uz ležišta ugljena. Rezultati eksperimenta dani su u tablici 5-3 i slici 5-9.

Tablica 5-3. Eksperimentalni podaci ispitivanja graničnog tlaka raspucavanja stijena (Bin et al., 2016)

Tip stijene	P(z) (MPa)	σ_c (MPa)	E (Gpa)	ν	Tlak pri kojem će doći do razrušavanja stijene mlazom fluida (MPa)
Meki pješčenjak-1	0,00	-	-	-	9,0
Meki pješčenjak-1	2,00	-	-	-	13,50
Meki pješčenjak-1	4,00	-	-	-	15,50
Ugljen-1	0,00	8,24	1,04	0,21	11,50
Ugljen-2	0,00	10,62	1,08	0,22	13,00
Ugljen-3	0,00	13,00	1,75	0,3	15,00
Ugljen-4	0,00	2,54	0,073	0,3	5,00

Gdje su:

P(z) – tlak pod kojim se nalazi uzorak stijene (MPa),

σ_c – tlačna čvrstoća (MPa),

E - Youngov modul elastičnosti (GPa) i

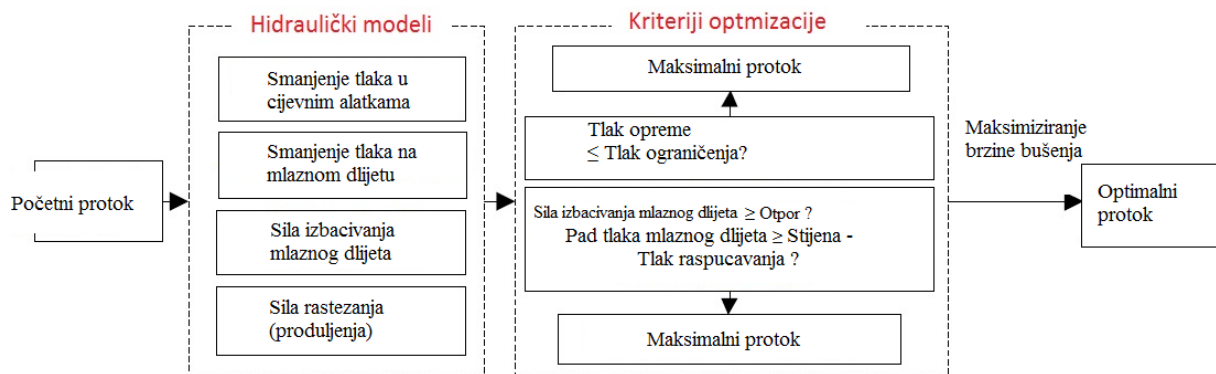
ν - Poissonov omjer.

Generalno gledajući gradijent tlaka (jednolična promjena ili razlika tlaka između dviju točaka) pri kojem će doći do razrušavanja stijene mlazom fluida iznosi 1MPa/1000 m (Bin et al., 2016).



Slika 5-9. Uzorci mekog pješčenjaka i ugljena korišteni u opisanom ispitivanju (Bin et al., 2016)

Maksimalna brzina protoka trebala bi osigurati da je radni tlak manji od tlaka rasprskavanja dubinske opreme. Najveća brzina protoka uzeta je kao optimalna kako bi se maksimalizirala brzina bušenja. Na kraju je dan blok dijagram za optimizaciju cijelog hidrauličkog sustava kod mlaznog bušenja (slika 5-10).



Slika 5-10. Optimiranje hidrauličkog sustava kod mlaznog bušenja (Bin et al., 2016)

5.5. Procedura hidrauličkog dizajna i terenska primjena

Podaci o ležištu i terenski podaci o bušotini A prikazani su u tablici 5-4. Preliminarni dizajn bušotine uključivao je šest radijalnih laterala bušenih u četiri sloja duljine sto metara. Sastav alata na dnu bušotine uključivao je alatke za glodanje kolone zaštitnih cijevi te alatke za mlazno bušenje. Alati korišteni u bušotini A specificirani su u tablicama 5-1 i 5-5.

Tablica 5-4. Podaci o ležištu i bušotini A (Bin et al., 2016)

Stvarna vertikalna dubina bušotine (m)	2360,00
Dubina ciljanog sloja (m)	2229,30 do 2318,40
Debljina ciljanog sloja (m)	2,60
Perforacije (m)	od 2229,3 do 2318,4; četiri sloja
Vanjski promjer proizvodnog niza cijevi (mm)	139,70
Debljina stijenki proizvodnog niza zaštitnih cijevi (mm)	9,20
Kvaliteta materijala od kojih su izrađene zaštitne cijevi	P110
Otklona kanala bušotine (stupnjevi)	Maksimalno 2,99
Ležište	Slabo propusni silit
Proizvodnja nafte (tona po danu)	0,80
Proizvodnja slojne vode (tona po danu)	3,60

Tablica 5-5. Sastav alata na dnu bušotine A (Bin et al., 2016)

Usmjerivač	73,03 mm (2 ^{7/8} ”) tubing + 139,7 mm (5 ½”) usmjerivač + 127 mm (5”) sidrište tubinga
Alatka za glodanje zaštitnih cijevi	Glodalo + fleksibilna osovina (vanjski promjer= 27 mm) + motor (vanjski promjer= 43 mm) + 38,1 mm (1 ½”) savitljiv tubing
Sklop za mlazno bušenje	Mlazno dlijeto + visokotlačno crijevo (vanjski promjer= 14 mm) + filter isplake + 38,1 mm (1 ½”) savitljiv tubing

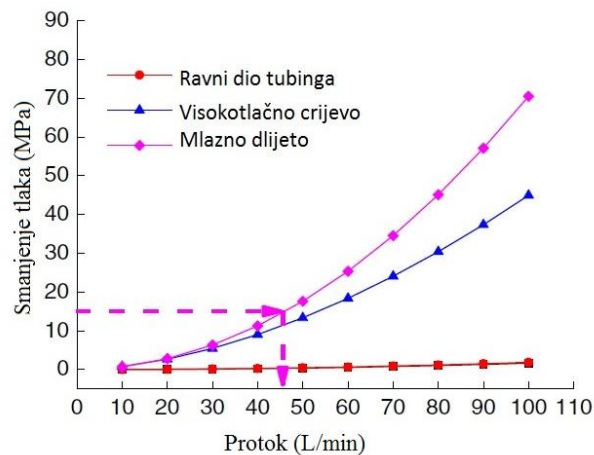
5.6. Optimiranje hidrauličkog sustava

Za primjer je uzeta laterala broj 3 na bušotini A gdje je optimalna brzina protoka dobivena i analizirana upotrebom predloženog modela hidrauličkog proračuna prikazanog na slici 5-10.

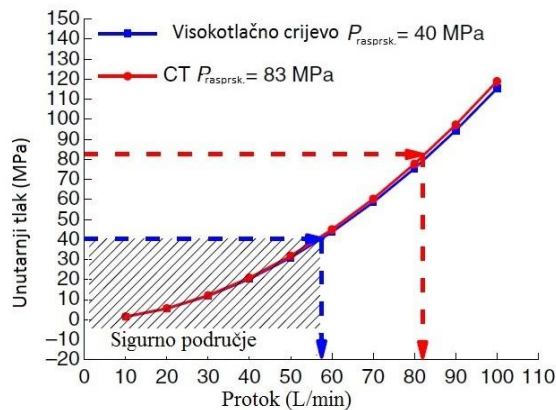
Prema projektu, dubina laterale 3 iznosila je 2 304,60 m a planirana duljina 100 metara. Kako je ukupna duljina savitljivog tubinga bila poznata (4 000 m), mogla se odrediti duljina spiralnog dijela savitljivog tubinga (namatanog na bubanj 1 695,4 m), horizontalnog dijela savitljivog tubinga (2304,6 m) i visokotlačnog crijeva koji iznosi 100 m.

5.7. Maksimalni protok

Smanjenje tlaka i unutarnji tlak u sustavu izračunati su pomoću ranije navedenih jednadžbi. Rezultati su prikazani na slikama 5-11 i 5-12. Prema rezultatima, smanjenje tlaka u visokotlačnom crijevu i mlaznom dlijetu predstavljali su najveće smanjenje tlaka (41,2 i 55,8%). Kako je prikazano u slici 5-12 maksimalni dozvoljeni unutarnji tlak savitljivog tubinga bio je 83 MPa (horizontalna crvena točkasta linija), a maksimalni dozvoljeni unutarnji tlak visokotlačnog crijeva iznosio je 40 MPa (horizontalna plava točkasta linija). Kako bi se izbjeglo puknuće visokotlačnog crijeva ili savitljivog tubinga unutarnji tlak uvijek treba biti manji od tlaka rasprskavanja visokotlačnog crijeva. Prema slici 5-12 može se odabrati maksimalni protok 57,24 L/min (vertikalna plava točkasta linija) pri kojem neće doći do rasprskavanja dubinske opreme. Osjenčani dio slike 5-12 predstavlja sigurno područje za izradu laterale.



Slika 5-11. Ovisnost smanjenja tlaka o protoku tijekom izrade 3. laterale (Bin et al., 2016)

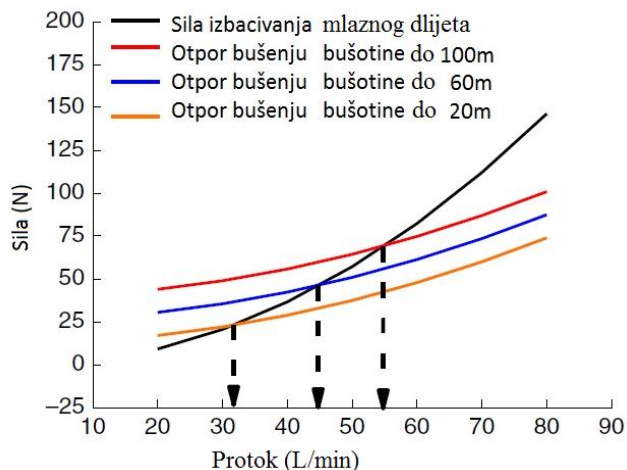


Slika 5-12. Ovisnost unutarnjeg tlaka o protoku visokotlačnog crijeva i savitljivog tubinga tijekom izrade 3. laterale (Bin et al., 2016)

5.8. Minimalni protok

Sila izbacivanja i lateralno pružajući otpor izračunati su upotrebom ranije prikazanih jednadžbi. Otpor kretanju u lateralnom smjeru procijenjen je kad su radijalne bušotine izbušene do 20, 40 i 100 m a rezultati su prikazani na slici 5-13. Kako bi se mlazno dlijeto kretalo prema naprijed, minimalna brzina protoka trebala bi osigurati da je sila izbacivanja F_{bit} veća od lateralno pružajućeg otpora F_r , te da smanjenje tlaka na mlaznom dlijetu Δp_b prelazi 15 MPa. Prema slici 5-11 minimalni protoka za razrušavanja stijena je 46,14 L/min (iscrtana roza linija). Iz slike 5-13 vidljivo je da je za lateralu duljine 100 m potreban

minimalni protok od 54,74 L/min (najudaljenija crna isprekidana linija). Kako bi se zadovoljila oba uvjeta istovremeno, odabran je minimalni protoka za izradu treće laterale bušotine A od 54,74 L/min.



Slika 5-13. Utjecaj otpora na lateralno kretanje niza i sile izbacivanja mlaznog dlijeta kod izrade treće laterale (Bin et al., 2016)

5.9. Optimalni protok

Kao što je prikazano u slici 5-11, smanjenje tlaka u savitljivom tubingu iznosi 1,16 MPa, što čini samo 3% ukupnog tlaka u sustavu, koji je iznosio 41,01 MPa u slučaju bušotine A. Gradijent smanjenja tlaka u savitljivom tubingu u bušotini A iznosio je 0,31MPa/1000m. Maksimalna udaljenost laterala bila je 18,30 m, te je dubina bušotine prema tome minimalno utjecala na optimalni protok. U konačnici, u bušotini A, optimalni protok određena je kao 57,24 L/min, čime se trebala maksimizirati brzina bušenja.

6. PRIMJERI RAZRUŠAVANJA STIJENA MLAZOM FLUIDA U HRVATSKOJ I INOZEMSTVU

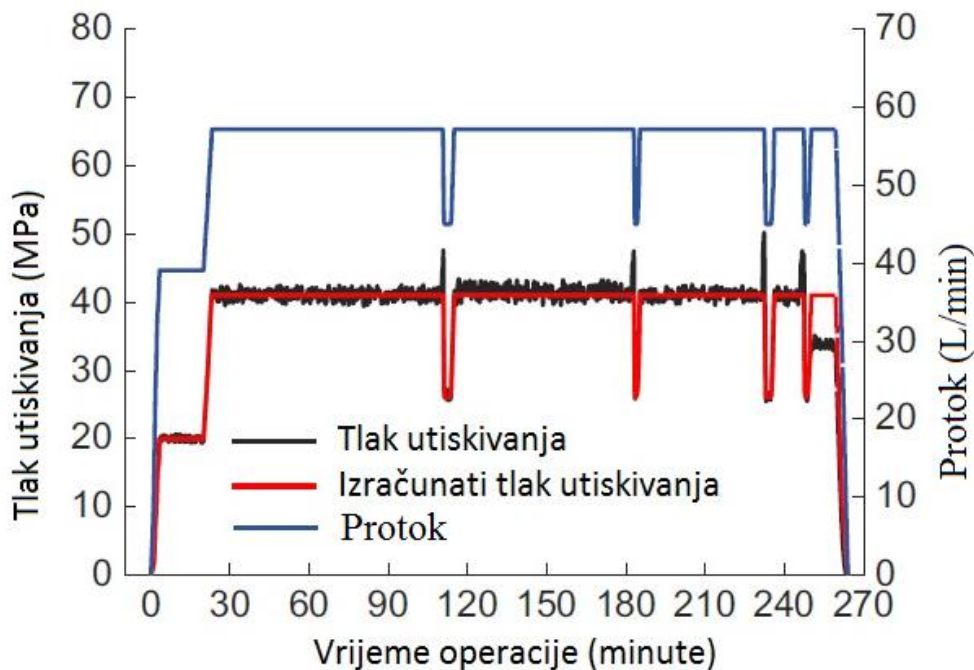
U ovom poglavlju opisani su primjeri bušotina u Kini, Kansasu te u Hrvatskoj na kojima je primjenjeno mlazno bušenje. U Hrvatskoj je kao pilot projekt odabrana bušotina Žutica-9

6.1. Bušotina A (Kina)

Nakon eksperimentalnog modela objašnjenog u prethodnom poglavlju, provedena je optimizacija sustava višestrukih izrada laterala koja je izvršena i konkretno primjenjena na terenu 2015. godine. U bušotini je izrađeno šest radijalnih laterala duljine 100 m bušenih u četiri sloja. Zbirni rezultati dobiveni mjerenjem na terenu dani su u tablici 6-1, dok su detaljni podaci prikazani slikom 6-1. Podaci o samoj bušotini A dani su u tablici 5-5. Rezultati hidrauličkih proračuna bili su približno jednaki sa onim dobivenim terenskom primjeru, a pogreška modela iznosila je svega 8% što je unutar granice dozvoljenih 10%.

Tablica 6-1. Operativni parametri tijekom izrade pojedine laterale na bušotini A (Bin et al., 2016)

Broj laterala	Dubina (m)	Duljina (m)	Promjer laterale (m)	Azimut (stupnjevi)	Protok ($L \cdot \text{min}^{-1}$)	Tlak (MPa)	Vrijeme operacije (min)	Brzina bušenja ($m \cdot \text{min}^{-1}$)
1	2299,70	100	0,7	NE288	57	39-41	405	0,25
2	2304,60	100	0,5	NE215	57	40-41	449	0,22
3	2304,60	100	0,5	NE288	57	38-41	432	0,23
4	2313,40	54	0,8	NE288	57	40-49	260	0,21
5	2318,10	100	0,6	NE215	57	39-41	412	0,24
6	2318,10	100	0,6	NE288	57	40-41	420	0,24



Slika 6-1. Usporedba terenskih mjerenja i modela za primjer izrade laterale broj četiri (Bin et al., 2016)

Dodatno, radno stanje opreme u bušotini može se odrediti na temelju praćenih parametara. Dramatično smanjenje tlaka ukazalo bi na puknuće visokotlačnog crijeva s obzirom na radne uvjete. Brzina radijalnog mlaznog bušenja ručno se kontrolira brzinom utiskivanja savitljivog tubinga. Kako je formacija heterogena, odnosno nalazi se u području sa stijenom velike tlačne čvrstoće. Kada je tlak frakturiranja stijena veći od smanjenja tlaka na mlaznom dlijetu čvrsta stijena sprječava daljnje prodiranje mlaznog dlijeta dok se savitljivi tubing i dalje utiskuje u bušotinu. U ovoj situaciji visokotlačno crijevo se uvija u velikoj mjeri što rezultira iznenadnim povećanjem tlaka. Kako bi se spriječilo pucanje visokotlačnog crijeva operater na terenu bi trebao trenutno smanjiti utiskivanje savitljivog tubinga i smanjiti protok.

Kako je prikazano na slici 6-1 registrirana su četiri nagla povećanja tlaka. U pojedinim slučajevima tlak razrušavanja stijene bio je znatno veći od smanjenja tlaka u mlaznom dlijetu te stijena nije bila dovoljno meka za daljnje prodiranje dlijeta. Na 54. metru četvrte laterale visokotlačno se crijevo rasprsnulo u dva navrata.

Ovo eksperimentalno istraživanje i terenska primjena mogu poslužiti kao vodič za razvoj sigurnijeg i efektivnijeg razrušavanja stijene mlazom fluida.

6.2. Polje Donelson West u Kansasu

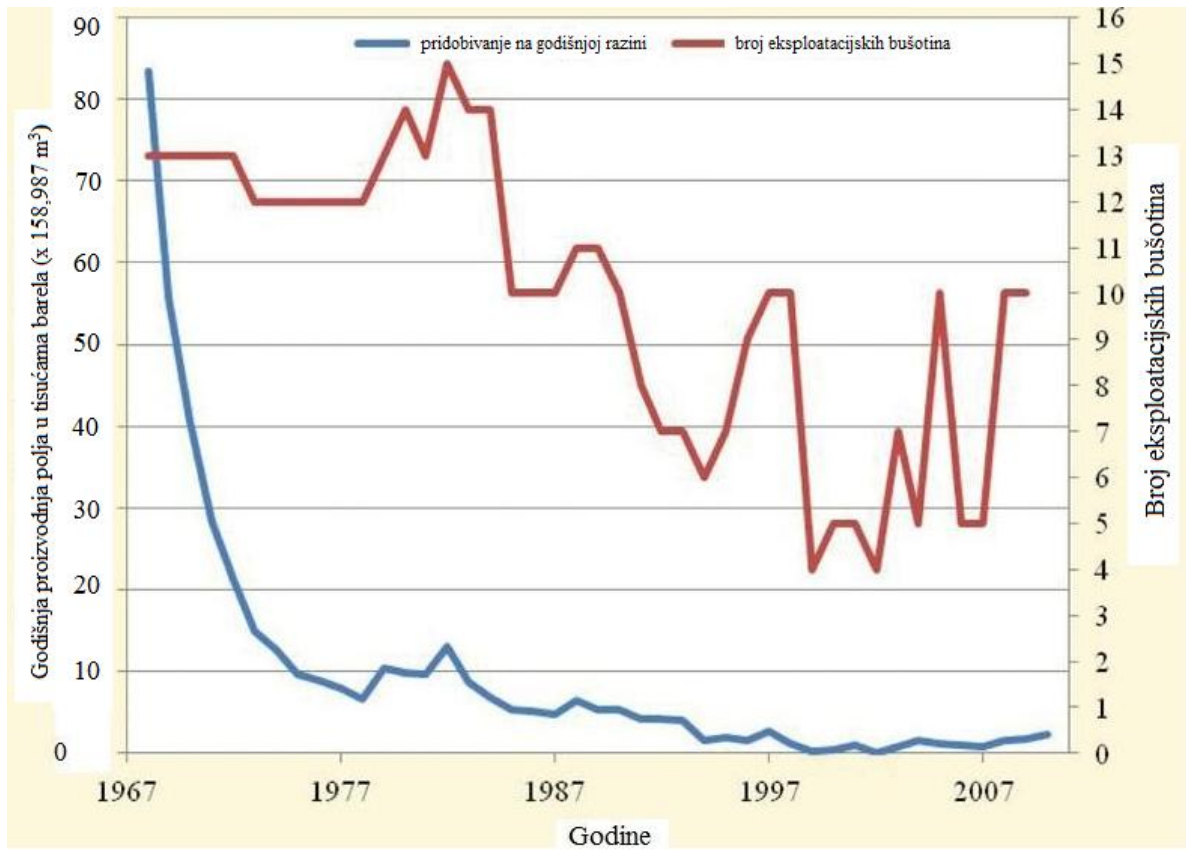
Donelson West je polje koje se nalazi u Kansasu, Sjedinjene Američke Države i zauzima površinu od 485,62 hektara (4 856 200 m²). Polje je staro 40-tak godina, a zbog slabe propusnosti te pada proizvodnje na jednom djelu polja operater je odlučio, 2010. godine, primjeniti kombinacija mlaznog bušenja i frakturiranja/kiselinskih obrada s ciljem povećanja proizvodnje.

Tip ciljane formacije koja je predodređena za mlazno bušenje bio je vapnenac, kristalni vapnenac koji varira u boji od svijetlo smeđe do smečkasto bijele. Poroznost ciljanog dijela ležišta proteže se u rasponu od 15 do 20%, propusnost od $0,00986923 \cdot 10^{-13}$ do $0,0986923 \cdot 10^{-13}$ m² dok je debljina sloja varirala od 1,83 do 3,05 m.

Mlazno bušenje u postojećim bušotinama Sjeverne Amerike pokazalo se ekonomski isplativije u odnosu na druge metode te se koristi od kasnih 1990-ih. na dubinama od 1371,6 m ili pliće (Cinelli i Kamel, 2013).

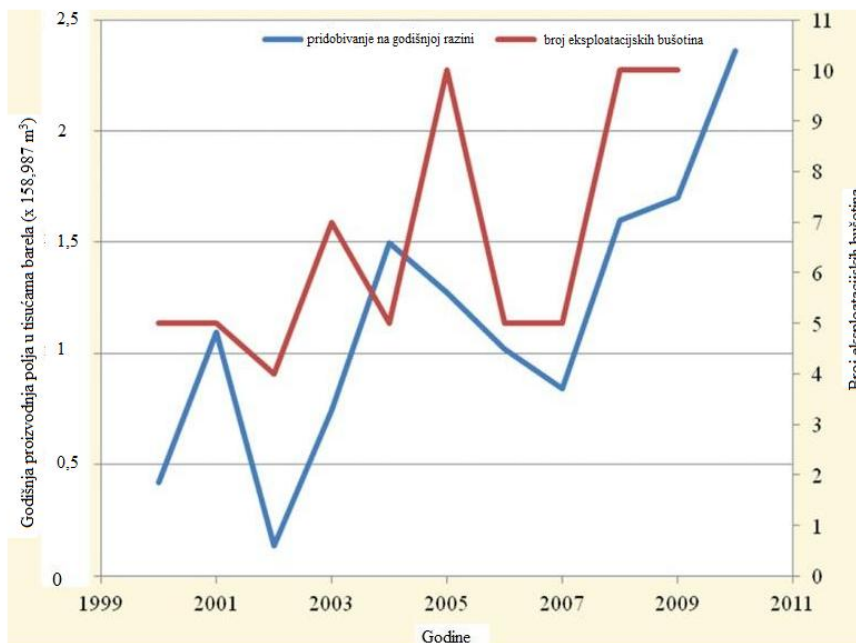
6.2.1. Povijest eksploatacije ležišta ugljikovodika na polju Donelson West

Eksploatacija ugljikovodika na polju Donelson započela je 1967. godine. Tijekom 1968. godine polje je proizvodilo 13195,93 m³ iz 13 bušotina, nakon čega došlo do smanjenja pridobivanja količine ugljikovodika kroz sljedeće godine. Tijekom 1973. godine pridobiveno je svega 2,362 m³ ugljikovodika. Proizvodnja polja bila je na vrlo niskim razinama te je pridobivenost od 2000. do 2009. godine u prosjeku iznosila 164 m³ ugljikovodika s najvećom godišnjom vrijednosti od 270 m³ u 2009. godini (slika 6-2).



Slika 6-2. Prikaz smanjenja eksploatacije na polju Donelson West (Cinelli i Kamel, 2013)

Zbog primarne iscrpljenosti polja godišnje pridobivene količine ugljikovodika u zadnjem desetljeću su relativno niske u odnosu na početne vrijednosti, odnosno vrijednosti izmjerene na početku eksploatacije. Slika 6-3 prikazuje proizvodnju polja te broj eksploatacijskih bušotina od 2000. do 2010. godine.



Slika 6-3. Povijesno pridobivanje ugljikovodika na polju Donelson West (Cinelli i Kamel, 2013)

Slika 6-3 prikazuje trend povećanja pridobivanja ugljikovodika na godišnjoj razini kroz razdoblje od 2000. godine do 2010. godine. Tijekom tog perioda također se uočava trend povećanja broja bušotina. Od 2001. do 2002. godine uočen je pad pridobivenih količina ugljikovodika te se broj eksploatacijskih bušotina smanjio sa 5 na 4. Kako su se eksploatacijske bušotine vraćale u pogon u 2003. i 2004. godini, dolazi do povećanja pridobivenih količina na godišnjoj razini. Od 2003. do 2004. broj bušotina se smanjio za dvije, no 2005. godine broj bušotina u proizvodnji iznosio je 10. Proizvodnja je svejedno od 2004. do 2007. godine padala što se može povezati sa smanjenim brojem bušotina u proizvodnji 2006. i 2007. godine. Nakon 2007. pridobivanje ugljikovodika je kontinuirano raslo od 159 m³/godini do 380 m³/godini.

Unatoč slaboj eksploataciji polja kroz zadnjih deset godina, polje ima potencijal s obzirom da je iscrpljena tek mala količina ugljikovodika. Do 2011. godine ukupno je pridobiveno na polju 71 544 m³. Procjenjene rezerve ležišta iznosile su 429 266 m³ što znači da je iscrpljeno svega 17% te je 349 772 m³ ostalo za eksploataciju. Kako je polje

imalo dugu povijest eksploatacije te velike količine potencijalno iskoristivih ugljikovodika pokazalo se kao kandidat za daljne investicije u povećanje eksploatacije.

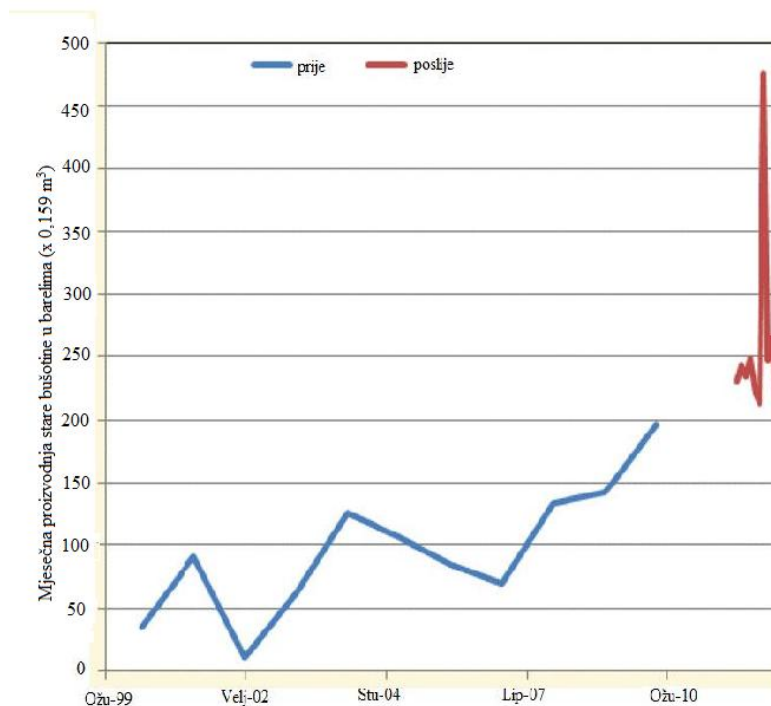
6.2.2. Razvoj polja

U 2010. godini novi operator dobio je koncesiju na površinu od 1 841 485 m² te je započeo razvoj programa povećanja eksploatacije ugljikovodika na spomenutom polju. Plan se sastojao od stimulacije postojećih ležišta. Plan se realizirao u nekoliko stadija gdje se inicijalni stadij sastojao od ponovnog opremanja i stimulacije 8 postojećih bušotina te bušenja 2 nove bušotine. Bušotine su bile izbušene radijalnim mlaznim bušenjem. Kada je bušenje laterala dovršeno sve bušotine su hidraulički frakturirane sa 56 781 l kiseline i 7 079 m³ dušika. Od 8 starih 7 je pokazalo dobru proizvodnju te je pušteno u pogon. Obje nove bušotine pokazale su dobru proizvodnju te su puštene u pogon. Povećanje proizvodnje prikazano je u tablici 6-2.

Tablica 6-2. Prikaz povijesti eksploatacije ugljikovodika na polju Donelson West prije i nakon stimulacije mlaznog bušenja (Cinelli i Kamel, 2013)

Pridobivene količine ugljikovodika			
Prije mlaznog bušenja		Poslije mlaznog bušenja	
Godina	m ³ /mj.	Mjeseci poslije	m ³ /mj.
2002.	11	1	1100
2003.	62	2	974
2004.	125	3	976
2005.	106	4	961
2006.	85	5	789
2007.	70	6	790
2008.	133	7	1124
2009.	142	8	797
2010.	197	9	803
Prosjek:	157 (zadnje 3. god)		938

Najveći mjesečni volumen pridobiven je iz ranije spomenute, dvije nove bušotine. Slika 6-4 prikazuje pridobivanje ugljikovodika prije i nakon stimulacija i korištenja metode mlaznog bušenja.



Slika 6-4. Prije mlaznog bušenja na ‘starim’ bušotinama pridobiveno je 32 m³/mjesec ugljikovodika, dok su nakon stimulacija pridobivene količine narasle na 80 m³/mjesec (Cinelli i Kamel, 2013)

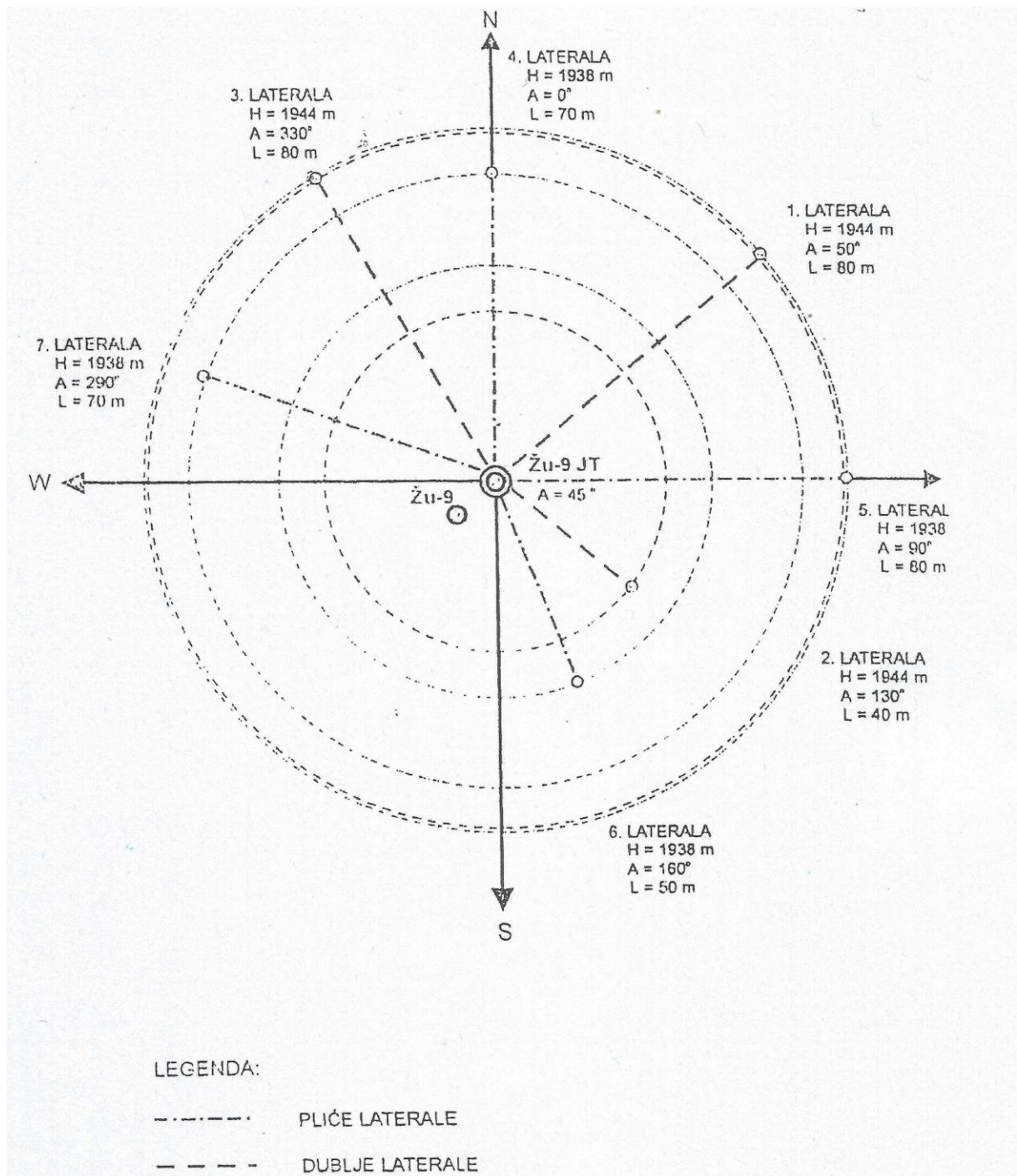
Prije nego li je novi operator dobio koncesiju, pridobivene količine ugljikovodika bile su minimalne te su iznosile 24 m³/mjesec. Nakon završetka bušenja te stimulacije pridobivanje je iznosilo 143 m³/mjesec. Nakon analiziranja došlo se do zaključka da je porast pridobivanja starih bušotina iznosilo 20% do 30% od ukupne pridobive količine ugljikovodika što je predstavljalo značajno povećanje. Metoda mlaznog bušenja pokazala se efektivna u bušenju novih i starih bušotina zbog povećanja ekonomičnosti bušenja, povećanja eksploatacije ležišta, mogućnosti upotrebe u različitim formacijama te povećane brzine bušenja laterala.

6.3. Bušotina Žu-9

Naftno polje Žutica pripada dijelu Panonskog bazena. Nalazi se oko 45 km južno od Zagreba u blizini Ivanić Grada. Prvi istražni radovi na ovom području sežu u daleku 1941/1942. godinu, kada je izvršen regionalni gravimetrijski premjer cijele sjeverozapadne Hrvatske. Nakon gravimetrijskih i seizmičkih mjerenja 1963. godine utvrđena je antiklinalna struktura polja te je izbušena prva bušotina. Do sad je izbušeno preko 300 različitih kanala bušotina. Naftno-plinonosne naslage polja Žutica predstavljene su sedimentima miocenske, pliocenske i kvaratne starosti. Najdublja ležišta su Gama serije čiji je strukturni oblik predstavljen antiklinalom s dva maksimuma, odvojena strukturnim sedlom.

Bušotina Žu-9 izbušena je 1965. godine. Predmet mlaznog bušenja je ležište Gama 1 koje se nalazi na dubini od 1932 do 1950 m, a sastoji se od srednje vezanog kvarc-tinjčastog pješčenjaka u izmjeni s više proslojaka lapora debljine 2 m. Obzirom na heterogenost ležišta bilo je potrebno probušiti sve produktivne intervale i privesti ih proizvodnji. Laterale je trebalo napraviti u dvije razine. Na donjoj razini (1944 m) tri laterale, i na gornjoj razini (1938 m) četiri laterale. Slika 6-5 prikazuje predviđeni smjer pružanja i duljine pojedinih laterala.

VERTIKALNA PROJEKCIJA PLANIRANIH LATERALA



Slika 6-5. Predviđeni smjer laterala na bušotini Žu-9 (Kovačević, 2004)

Podaci o samom ležištu Gama 1 prikazani su u tablici 6-3:

Tablica 6-3. Podaci o ležištu Gama 1 na bušotini Žu-9 (Kovačević, 2004)

Podaci za ležište	
Ležište	Gama 1
Poroznost	18,6 %
Propusnost	0,07599 μm^2
Početno zasićenje vodom	34,9%
Intervali (krovina-podina)	1932 m-1950 m
Efektivna debljina sloja	7m
Tlak u ležištu	80 bar
Temperatura ležišta	93 °C

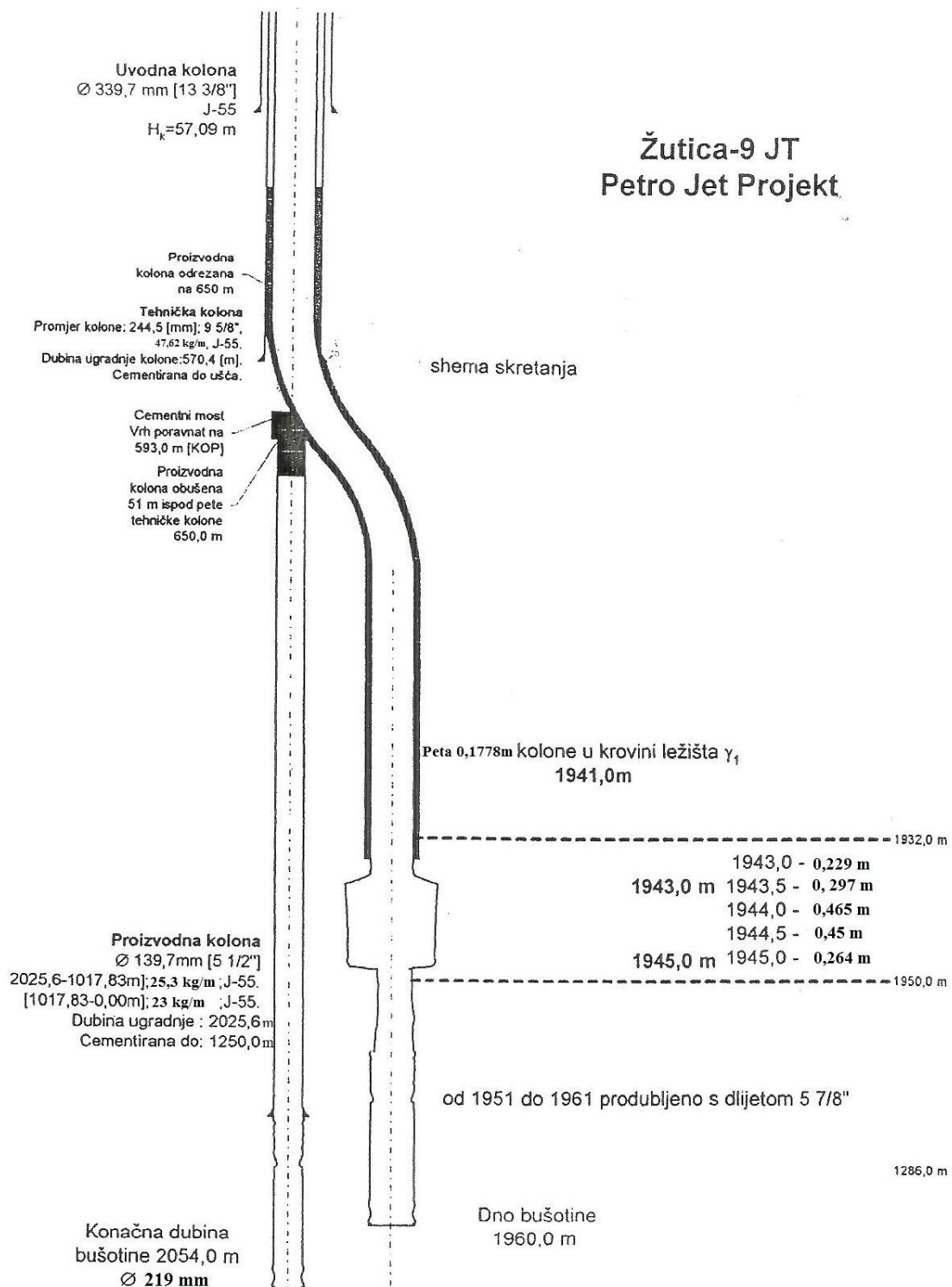
Bušotina je bila zacijevljena kolonom nominalnog vanjskog promjera (nominalni promjer je stvarna mjera veličine čestice neovisno o obliku i gustoći čestice) 0,139 m (5 1/2") ugrađenom do 2025,6 m i zacementiranom do 1250 m. Pridobivanje je ostvareno pomoću dubinske sisaljke pri čemu su dobivene sljedeće količine fluida:

$$Q_{\text{nafte}} = 4,53 \text{ m}^3/\text{dan}$$

$$Q_{\text{vode}} = 0,49 \text{ m}^3/\text{dan}$$

$$Q_{\text{plina}} = 409 \text{ m}^3/\text{dan}$$

Konstrukcija same bušotine Žu-9 kao i detaljni prikaz planiranih radova prikazani su na slici 6-6.



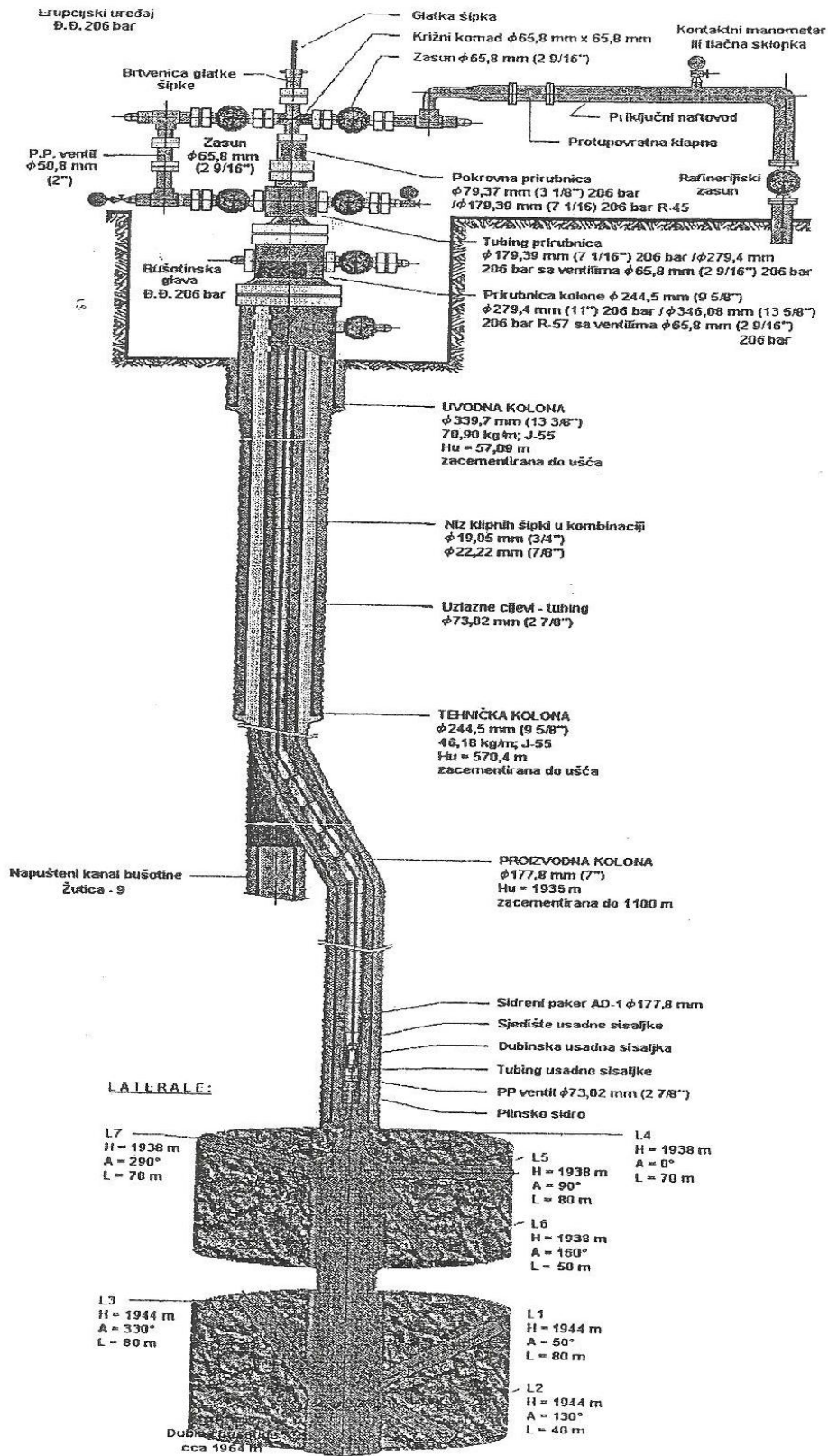
Slika 6-6. Prikaz planiranih radova na bušotini Žu-9 (Kovačević, 2004)

Gdje je:

KOP- točka skretanja kanala, m

Na slici 6-7 prikazani su svi izvedeni radovi na bušotini Žu-9

Izvedeni radovi:



Slika 6-7. Prikaz izvedenih radova na bušotini Žu-9 (Kovačević, 2004)

6.3.1. Opis radova na bušotini Žu-9

Iz bušotine je izvađena proizvodna oprema, postavljen je cementni čep na 1834,5 m te je odrezana proizvodna kolona zaštitnih cijevi na 650 m i izvađena iz bušotine. Nakon toga postavljen je cementni čep kao oslonac za skretanje i poravnat na dubinu 593 m. Točka skretanja (KOP) u starom kanalu je na 593 m. Izrađen je novi kanal bušotine paralelno sa starim do 1951 m, promjera 0,2159 m (8 ½"). Postavljen je čep od 1951-1944 m. Ugrađena je kolona zaštitnih cijevi 0,1778 m (7") do 1941 m. Zatim je bušotina pročišćena i produbljena do 1960 m dlijetom 0,14922 m (5 ¾") Za postavljanje otklonskog klina bilo je potrebno proširiti kanal bušotine na minimalno 0,610 m promjera i duljini od 2,5 m na obje razine s kojih su se trebale izrađivati laterale.

Proširenje je izvela servisna kompanija Baker Oil Tools. Alatke za proširivanje su u vlasništvu iste tvrtke te su imale promjer 0,14605 m (5 ¾") s noževima 0,6096 m (24"). Također su korišteni i noževi koji su u vlasništvu tvrtke INA za proširivanje na promjer 0,4572 m (18"). Proširivanje je u početku obavljano pomoću hidrauličko-rotacijske glave, a kasnije uz pomoć vrtaćeg stola i isplachne pumpe. Prema obavljenom elektrokarotaznom mjerenju zona je djelomično proširena na 0,508 m (20") u intervalu od 1 m što je nedovoljno za smještaj otklonskog klina pa se odustalo od lateralnog bušenja. Najveće proširenje kanala nalazi se u intervalu od 1943-1945 m. U bušotini je ostalo 9 noževa na dubini od 1945 m i nekoliko na dnu bušotine što je pokazalo obavljeno mjerenje karotaznom sondom.

U bušotini je obavljeno pročišćavanje kolone do 1945,84 m, kemijska obrada sloja te je ponovno ugrađena proizvodna oprema s dubinskom sisaljkom.

Parametri bušotine nakon puštanja u proizvodnju:

$$Q_{\text{nafte}} = 0,63 \text{ m}^3/\text{dan}$$

$$Q_{\text{vode}} = 1,10 \text{ m}^3/\text{dan}$$

$$Q_{\text{plina}} = 100 \text{ m}^3/\text{dan}$$

Kao što se vidi, smanjene su dnevne pridobive količine nafte nakon puštanja u rad za oko 14%.

Bušotina je promjenila proizvodne parameter nakon puštanja u rad bez ikakve dodatne obrade sloja. Mlazno bušenje, odnosno izrada laterale u konkretnom slučaju nije uspjela. Navedeni primjer jako dobro ilustrira potencijalne probleme vezane uz praktičnu primjenu mlaznog bušenja.

Proizvodnja početkom 2004-te godine (Kovačević, 2004):

$Q_{nafte}=1,62 \text{ m}^3/\text{dan}$

$Q_{vode}=0,39 \text{ m}^3/\text{dan}$

$Q_{plina}=100 \text{ m}^3/\text{dan}$

Odnos proizvodnje danas i prije pokušaja izrade laterale je manji i iznosi oko 64%. Pridobivanje iz bušotine trenutno se obavlja uz pomoć dubinske sisaljke u ciklusima 3x4 sata (tri puta u danu po četiri sata rada).

7. ZAKLJUČAK

Razrušavanje stijena mlazom fluida definitivno ima svoju budućnost u naftnom rudarstvu. Iako je to novija tehnologija dosta se ulaže u njen razvoj i primjenu.

Mnoge svjetske poznate tvrtke (BRITISH PETROLEUM, CHEVRON, TOTAL itd.) okušale su se u mlaznom bušenju. Rezultati su naravno različiti zbog različitih uvijeta u svakoj bušotini. Uspješnost razrušavanja stijena mlazom fluida u starim bušotinama ili iz bušotina s oštećenom pribušotinskom zonom nije upitna te je kao takva mnogo puta dokazana. Međutim kod samog izvođenja mlaznog bušenja na terenu uočeni su određeni problemi čije se rješavanje očekuje u budućnosti.

Sama oprema za mlazno bušenje još ima dosta prostora za napredak, odnosno za razvitak boljeg i kvalitetnijeg alata za mlazno bušenje. To se prvenstveno odnosi na alatku za otklanjanje kuta bušotine (klin) te na mlazno dlijeto.

Najznačajniji problemi javljaju se u proslojcima tvrdih naslaga te prilikom proširenja kanala bušotine u istim.

Što se tiče Hrvatske, primjena mlaznog bušenja na polju Žutica, odnosno bušotini Žu-9 bila je neuspješna zbog problema s izradom proširene zone za postavljanje klina. Problem je predstavljala nestabilnost područja u koje je trebala biti smještena proširena zona kao i odabir same opreme koja je korištena za njenu izradu. Nestabilnost proširene zone je bila prisutna te bušenje nije ispunilo očekivanja. Također oprema koja je bila korištena pri bušenju bila je nezadovoljavajuća pri većim opterećenjima.

Moglo bi se reći da je zadnjih nekoliko godina ova tehnologija napredovala, ali ima još dosta prostora za unapređenje postojeće tehnologije te same opreme kojom se koristi kod mlaznog bušenja.

8. LITERATURA

1. BIN W., GENSHENG L., ZHONGWEI H., JINGBIN L., DONGBO Z. AND HAO L., 2016. Hydraulics Calculations and Field Application of Radial Jet Drilling, SPE-179729-PA China University of Petroleum, Beijing, March 2016.
2. DICKINSON W., ANDERSON R. R. AND DICKINSON R. W., 1989. The Ultrashort Radius Radial System, SPE-184804-PA, Drilling Conference held in Dallas, February 10-12.
3. DICKINSON W., HERRERA A., DYKSTRA H., NEES J. AND DICKINSON R.W., 1992a. Slim Hole Multiple Radials Drilled With Coiled Tubing, SPE-23639, presented at the Second Latin American Petroleum Engineering Conference of the SPE, Caracas, Venezuela, March 8-11.
4. DICKINSON W., DICKINSON E., NEES J.M. AND DYKASTRA H., 1992b. The Ultrashort Radius Radial System Applied to Thermal Recovery of Heavy Oil, SPE-24087, presented at the Western Regional Meeting of the SPE, Bakersfield, California, March 30-April 1.
5. GANG B., GENSHENG L., ZHONGHOU S. ET AL., 2013. Experimental Research on the Technology of Hydra-Jet Sidetracking of Radial Micro-bore-hole, J. Eng. Sci. Tech. Rev. 6(5): str. 137-142.
6. KOVAČEVIĆ A., 2004. Mlazno bušenje, Diplomski rad, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
7. LI J., LI G., HUANG Z., ET AL, 2015. The Self-Propelled Force Model of a Multi-Orifice Nozzle for Radial Jet Drilling. J. Nat. Gas Sci. Eng. 24 (May): str. 441-448.
8. BUCKMAN JET DRILLING 2003., Buckman's Patented Nozzle,
URL: <http://www.buckmanjetdrilling.com/nozzles.html> (21.01.2017.)
9. CINELLI S.D., KAMEL A.H., 2013. Low-cost radial jet drilling helps revitalize 40-year-old oilfield,
URL: <http://www.drillingcontractor.org/low-cost-radial-jet-drilling-helps-revitalize-40-year-old-oilfield-23377> (01.02.2017.)

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.
