Izrada horizontalnih bušotina velikog dosega

El Sabeh, Karim

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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:169:963335

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

IZRADA HORIZONTALNIH BUŠOTINA VELIKOG DOSEGA

Karim EL Sabeh

N136

Zagreb, 2015

Sveučilište u Zagrebu Diplomski rad
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Izrada horizontalnih bušotina velikog dosega

Karim EL Sabeh

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

Sažetak

Temeljna svrha izrade horizontalnih (vodoravnih) bušotina, tj. bušotina kojima proizvodni dio kanala zauzima horizontalan položaj u prostoru, jest povećanje dodira kanala bušotine s ležištima nafte i/ili plina, te na taj način povećavanja proizvodnosti tih bušotina. Izrada bušotina velikog dosega postao je čest način izrade bušotine koji omogućava ekonomičan pristup rezervama koje su prethodno bile izvan dohvata, uz postojeću infrastrukturu, i smanjuje utjecaj proizvodnih postrojenja na okoliš. Većina horizontalnih bušotina izrađuju se zbog razrade raspucanih stijena u ležištu, ležišta s potencijalnim problemima konusiranja vode i/ili plina te ležišta s proizvodnim naslagama male debljine. U radu su prikazani primjeri izrade horizontalnih bušotina velikog dosega, oprema koja je pri tom korištena, te problemi koji se javljaju prilikom izrade ovakvih bušotina.

Ključne riječi: bušenje, horizontalne bušotine velikog dosega, nateg, torzija, faktor trenja
Diplomski rad sadrži: 68 stranica, 4 tablica, 33 slika i 14 referenci.
Jezik izvornika: Hrvatski
Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb
Mentor: Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNF-a
Stručna pomoć pri izradi: Mag. Ing. Petar Mijić, asistent RGNF-a
Ocjenjivači : 1. Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNF-a
2. Dr. sc. Katarina Simon, redovita profesorica RGNF-a
3. Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a

Datum obrane: 24. rujna 2015.

University of Zagreb Master's Thesis

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Extended reach well drilling

Karim EL Sabeh

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

Abstract

The main purpose of drilling horizontal wells i.e. wells who's production comes from the horizontal section , it enhances the wellbore kontakt with the reservoir containing oil and/or gas, and by that increasing the production of these wells. Extended-reach drilling (ERD) has become a common means to access reserves economically from existing infrastructure, that were previously out of reach, and reduce the environmental footprint of production facilities. Most of the horizontal wells are drilled to develope the cracked rocks in the reservoir, reservoirs with potential water coning problems and reservoirs with small reservoir production thickness. The paper presents examples of extended reach wells, equipment that was used to drill, and the problems that occur when drilling such wells.

Key words: drilling, extended reach wells, drag, torque, friction factor

Thesis contains: 68 pages, 4 tables, 33 pictures, and 14 references

Original in: Croatian

Final work is deposited in: Library of the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: PhD Nediljka Gaurina-Međimurec, Full Professor

Technical support and assistance: Mag. ing. Petar Mijić, assistant professor, FMGP

Evaluators: 1. PhD Nediljka Gaurina-Međimurec, Full Professor, FMGP
2. PhD Katarina Simon, Full Professor, FMGP
3. PhD Borivoje Pašić, Assistant Professor, FMGP

Thesis defense: September 24 2015.

SADRŽAJ:

POPIS TABLICA ..... **III**

POPIS SLIKA ..... **IV**

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA ..... **VI**

POPIS KORIŠTENIH KRATICA ..... **VII**

1. UVOD 1

2. PODJELA HORIZONTALNIH BUŠOTINA 4

3. KLASIFIKACIJA BUŠOTINE 7

4. OTKLANJANJE KANALA BUŠOTINE 8

4.1. Klinovi **8**

4.2. Skretanje mlazom **10**

4.3. Rotirajući bušaći sklopovi u usmjerenim bušotinama **11**

4.3.1. Sklop za povećavanje kuta otklona 12

4.3.2. Sklop za održavanje kuta otklona 13

4.3.3. Sklop za smanjenje kuta otklona 13

4.4. Upravljivi motor s podesivim kućištem **13**

4.5. Rotirajući upravljivi sustavi **15**

4.5.1. “Push the bit” sustav 16

4.5.2. "Point the bit" sustav 17

5. KONSTRUKCIJA BUŠOTINE 18

5.1. Dizajn i opterećenja zaštitnih cijevi **21**

5.1.1. Naprezanja u horizontalnoj sekciji 22

5.1.2. Naprezanja u otklonjenoj sekciji 27

5.1.3. Naprezanja u vertikalnoj sekciji 29

6. PRIMJERI IZRADE HORIZONTALNIH BUSOTINA VELIKOG DOSEGA 31

6.1. Izrada horizontalne bušotine velikog dosega u – Kataru **31**

6.1.1. Izrada bušotine BD-04A 34

6.1.2. Izrada gornjeg dijela kanala bušotine promjera 0,4064 m (16 in.) i 0,31115 m (12 ¼ in.) 36

6.1.3. Izrada dijela kanala bušotine promjera 0,2159 m (8 ½ in.) kroz ležište 36

6.1.4. Ključne promjene koje su omogućile izradu bušotine BD-04A 40

6.2. Izrada horizontalne bušotine velikog dosega na - Sakhalinu 43
6.2.1. Pregled dizajna bušotina polja Odoptu..... 44
6.2.2. Izrada bušotine OP-11..... 46
6.2.3. Tijek izrade bušotine OP-11..... 47
6.2.4. Izrada i zacjevljenje kanala bušotine promjera 0,4445 m (17 ½ in.) 48
6.2.5. Izrada i zacjevljenje kanala bušotine promjera 0,31115 m (12 ¼ in.) 50
6.2.6. Izrada kanala bušotine promjera 0,2159 m (8 ½ in.) te završno proizvodno opremanje gornjeg i donjeg dijela kanala bušotine..... 52
6.3. Izrada horizontalne bušotine velikog dosega u svijetu – Saudijska Arabija..... 57
6.3.1. Dizajn bušotina Manifa polja 59
6.3.2. Sažeti opis izrade kanala bušotine A..... 61
7. ZAKLJUČAK..... 66
8. LITERATURA 67

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Podjela horizontalnih bušotina 5
Tablica 6-1. Karakteristike pojedinih ležišta sa polja AL Shaheen 32
Tablica 6-2. Horizontalne duljine bušotina velikog dosega 33
Tablica 6-3. Prednosti kombinirane kolone bušaćih šipki 41

POPIS SLIKA

Slika 1-1. Dijelovi kanala horizontalne bušotine 1
Slika 1-2. Osnovni tipovi horizontalnih bušotina velikog dosega 3
Slika 2-1. Podjela horizontalnih bušotina s obzirom na polumjer zakrivljenja 6
Slika 3-1. Odnos stvarne vertikalne dubine (TVD) i dosega 7
Slika 4-1. Primjer klina za skretanje 9
Slika 4-2. Otklanjanje kanala bušotine pomoću klina 9
Slika 4-3. Dlijeto za usmjereno bušenje s produljenom mlaznicom 10
Slika 4-4. Način razrušavanja stijene mlaznim bušenjem 11
Slika 4-5. Rotirajući bušaći sklopovi 12
Slika 4-6. Upravljivi motor s podesivim kućištem 14
Slika 4-7. Način rada upravljivih motora pri kliznom odnosno rotirajućem načinu rada 15
Slika 4-8. Razvoj upravljivih sustava kroz godine 16
Slika 4-9. Način rada „push the bit“ sustava 17
Slika 4-10. Način rada „point the bit“ sustava 17
Slika 5-1. Dijelovi kanala horizontalne bušotine 18
Slika 5-2. Način izvijanje cijevnih alatki u vodoravnom dijelu kanalu bušotine 20
Slika 5-3. Razdioba tlačne sile u cijevima u vodoravnom dijelu kanala bušotine 20
Slika 5-4. Prikaz sila koje djeluju na cijevi, (A) prikaz element cijevi, (B) prikaz opterećenja 23
Slika 5-5. Primijenjeno opterećenje potrebno za potiskivanje zaštitnih cijevi kroz 25
horizontalnu sekciju (El-Sayed et al., 1991) 25
Slika 5-6. Primijenjeno opterećenje koje je potrebno za potiskivanje kolone zaštitnih cijevi s otvorenim krajem kroz horizontalnu sekciju kanala bušotine 26
Slika 5-7. Primijenjeno opterećenje koje je potrebno za potiskivanje kolone zaštitnih cijevi zatvorenog kraja kroz horizontalnu sekciju kanala bušotine 26
Slika 5-8. Povećanje opterećenja zaštitnih cijevi tijekom ugradnje za različite kutove otklona 28
Slika 5-9. Opterećenje kao funkcija porasta kuta otklona 28
Slika 6-1. Blok 5 na Al Shaheen polju 31
Slika 6-2. Usporedba bušotine BD-04A s ostalim bušotinama velikog dosega 35
Slika 6-3. Otok Sakhalin sa poljima Chayvo, Odoptu i Arkutun Dagi 44
Slika 6-4. Doseg bušotine OP-11 u odnosu na doseg ostalih bušotina u svijetu 46

Slika 6-5. Trajektorija kanala bušotine OP-11 na polju Odoptu, Sakhalin 47

Slika 6-6. Smanjenje opterećenja na kuki tijekom ugradnje kolone zaštitnih cijevi promjera 0,3461 m (13 5/8 in.) 49

Slika 6-7. Opterećenje na kuki tijekom ugradnje proizvodne opreme u donji dio kanala .. 55

Slika 6-8. Vrijeme trajanja izrade bušotine OP-11 56

Slika 6-9. Profil bušotine A izbušene na polju Manifa u Saudijskoj Arabiji 61

Slika 6-10. Rotirajuća alatka NC50 61

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

A- površina poprečnog presjeka cijevi, m^2

D - nominalni promjer zaštitnih cijevi, m

E- youngov modul elastičnosti, Pa

F_{as} - ekvivalentna uzdužna sila zbog savijanja, N

F_{cr} - kritična sila sinusoidalnog (valovitog) izvijanja, N

F_{hel} - kritična sila spiralnog izvijanja, N

F_n- normalna (okomita) sila koja djeluje na element, N

F_t - aksijalna vlačna sila na donjem kraju elementa, N

I - polarni moment otpora, m^4

l - duljina luka kružnice (funkcija intenziteta promjene kuta otklona, α), m

M- torzija na donjem kraju elementa, Nm

R- zračnost između tubinga i zaštitnih cijevi, m

r - polumjer elementa cijevi, m

W – težina elementa cijevi u isplaci, N

w' - težina niza po jedinici duljine kada je uronjen u fluide, $N \cdot m^{-1}$

θ - otklon kanala bušotine, °

δF_t - povećanje aksijalne sila koja djeluje na element, N

α - kut azimuta, ° ili radijan

$\delta\alpha$ – povećanje kuta azimuta, ° ili radijan

θ – kut otklona kanala bušotine, ° ili radijan

$\delta\theta$ – povećanje kuta otklona, ° ili radijan

θ°- kut azimuta, ° ili radijan

μ - koeficijent trenja zbog klizanja između zaštitnih cijevi i kanala bušotine, -

δM - povećanje momenta torzije, Nm

Π- ludolfov broj, 3,14

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

BHA - dubinski bušaći sklop (*engl. bottom hole assembly*)

CHFF - faktor trenja u otvorenom kanalu

DC - teška šipa

DC_{Am} - nemagnetska teška šipka

ECD - ekvivalentna cirkulacijska gustoća isplake

EOR - povećanje iscrpka nafte, pospješeno iscrpljivanje nafte (*engl. enhanced oil recovery*)

ERD - izrada bušotina velikog dosega (*engl. extended reach drilling*)

FG - nominalni promjer (*engl. full gauge*)

LWD - alatke (sonde) za karotažna ispitivanja tijekom bušenja (*engl. logging-while-drilling tools*)

MB - sredina tijela teške šipke

MD - mjerena duljina (*engl. measured depth*)

MDRT - mjerena duljina od vrtaćeg stola (*engl. measured depth, rotary table*)

MWD - mjerenje tijekom bušenja (*engl. measurements-while drilling tools*)

NB - blizu dlijeta

OHFF - faktor trenja u zacjevljenom kanalu

PDM - dubinski volumetrijski isplačni motor

TD - konačna dubina (*engl. total depth*)

TVD - stvarna vertikalna dubina (*engl. true vertical depth*)

TVDRT - stvarna vertikalna dubina od vrtaćeg stola (*engl. true vertical depth, rotary table*)

UG - smanjeni promjer (*engl. under gauge*)

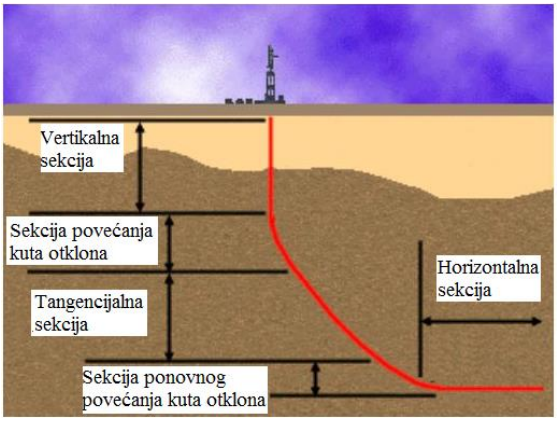
NFA - isplaka koja nije na bazi vode (*engl. non-aqueous fluid*)

RSS - rotirajući upravljivi sustavi (*engl. rotary steerable systems*)

1. UVOD

Temeljna svrha izrade horizontalnih (vodoravnih) bušotina, t.j. bušotina kojima proizvodni dio kanala zauzima horizontalan položaj u prostoru, jest povećanje dodira kanala bušotine s ležištima nafte i/ili plina, te na taj način povećavanja proizvodnosti tih bušotina. Osim proizvodnih bušotina s horizontalnim kanalima, vodoravne kanale mogu imati i utisne bušotine, čime se postiže velika dodirna površina kanala bušotine i ležišnih stijena pa se povećava djelotvornost utiskivanja fluida (injektivnost), što je značajno za pospješeno iscrpljivanje nafte (*engl. EOR-enhanced oil recovery*) (Steiner, 1994).

Horizontalni kanal bušotine buši se uglavnom usporedno (paralelno) s pružanjem naslaga stijena. Točnije vertikalni (uspravni) kanal bušotine je onaj koji presijeca horizontalne naslage pod kutom od 90˚, a horizontalni (vodoravni) je onaj koji ide usporedno s horizontalnim naslagama (Steiner, 1994). Na slici 1-1 prikazani su dijelovi kanala horizontalne bušotine.



Slika 1-1. Dijelovi kanala horizontalne bušotine (Directionaldrilling.wordpress.com, 2015)

Za razliku od proizvodnosti uspravnih bušotina, koja uglavnom ovisi o pokazateljima probušenih stijena (šupljikavosti, propusnosti, zasićenje fluidima i pornom tlaku), kod horizontalnih bušotina proizvodnost uvelike ovisi o duljini horizontalnog dijela kanala bušotine kroz proizvodnu stijenu, a duljina pak, osim o prirodnom litološkom sastavu stijena te o geotermodinamičkim uvjetima, i o odabranom tipu horizontalne bušotine (Steiner, 1994).

Većina horizontalnih bušotina izrađuje se zbog jednog od triju razloga (Steiner, 1994):

1. razrade raspucanih (frakturiranih) ležišta;

2. razrade ležišta s potencijalnim problemima konusiranja vode i/ili plina;
3. razrade ležišta s proizvodnim naslagama male debljine.

Po tipu razlikuje se horizontalne (vodoravne) bušotine (Steiner, 1994):

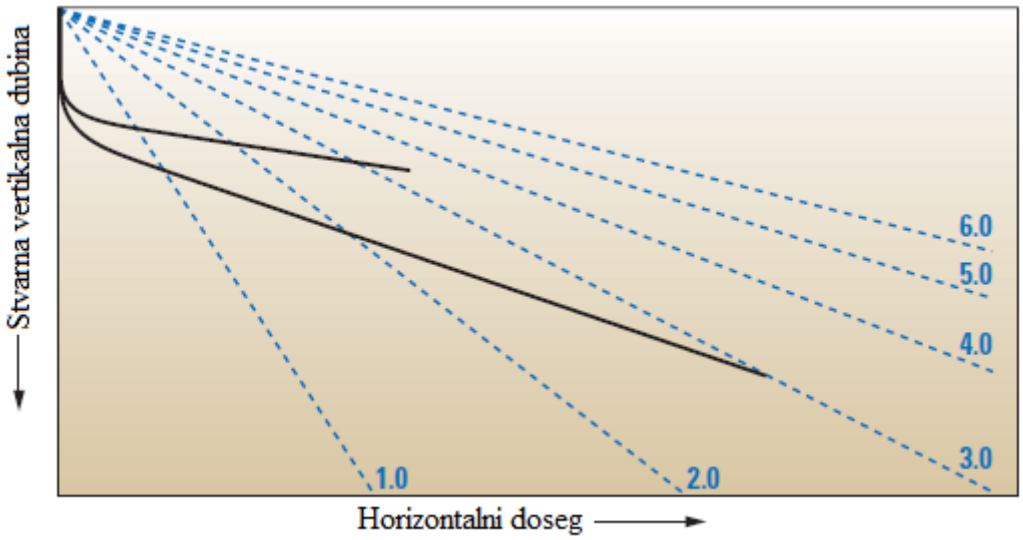
- s izuzetno malim polumjerom zakrivljenja;
- s malim polumjerom zakrivljenja;
- sa srednjim polumjerom zakrivljenja i
- s velikim polumjerom zakrivljenja.

Horizontalno (vodoravno) bušenje je dobro utemeljena tehnologija izrade kanala bušotine s rastućom popularnošću za razradu i eksploataciju ležišta ugljikovodika koja bi u suprotnom bila neekonomična. Horizontalno bušenje zahtjeva puno inženjerskog posla u usporedbi s konvencionalnim koso usmjerenim bušenjem. Značajni napredak u tehnologiji bušenja omogućilo je bušenje horizontalne bušotine u bilo kojem smjeru korištenjem specijalnih alatki. Određeni problemi u ovoj tehnici još postoje, kao što je dizajn zaštitnih cijevi. U većini slučajeva horizontalne bušotine, su završene s ostavljenim otvorenim kanalom bušotine ili je u kanal bušotine ugrađen lajner s prorezima (*engl. slotted liner*). Ovaj tip završnog opremanja je jednostavan i nije skup, ali zbog nedovoljnog podržavanja stjenki kanala bušotine ne omogućava dulji radni vijek bušotine (El-Sayed et al, 1991).

Bušotina velikog dosega (*engl. extended reach drilling (ERD)*) postao je čest način koji omogućava ekonomičan pristup rezervama iz postojećih infrastruktura, omogućava pristup rezervama koje su prethodno bili izvan dohvata, i smanjuje utjecaj na proces bušenja i proizvodnih postrojenja na okoliš (Walker, 2012). Tijekom bušenja na moru tehnologija izrade bušotina velikog dosega smanjuje utjecaj na okoliš, , limitira prisutnost bušaćih platformi, smanjuje podvodnu buku i druge aktivnosti. U slučaju da je bušotina izbušena s lokacije na kopnu, kako bi dosegli naftu i plin duboko ispod oceana, interakcija s morskim životom i morskim okolišem može biti u potpunosti eliminirana (Exxon mobil 2015).

Horizontalne bušotine s vrlo velikim dosegom mogu imati veoma duge kanale (mjerena duljina bušotina-*engl. measured depht-MD-m*) i na relativno maloj dubini (*engl. true vertical depth-TVD-m*), kao i relativno kratke i vrlo plitke vertikalno kao što je prikazano na slici 1-2. Veoma duge bušotine su izbušene do granice ležišta kako bi smanjili utjecaj infrastrukture kao i operativni utjecaj koji bi u tom slučaju bili potrebni za

pristup ležištu. Relativno kratke bušotine su izbušene tako da bi omogućili potrebnu duljinu kontakta u vrlo plitka ležišta (PetroWiki 2015a).



Slika 1-2. Osnovni tipovi horizontalnih bušotina velikog dosega (Bennetzen et al., 2010)

2. PODJELA HORIZONTALNIH BUŠOTINA

Horizontalne bušotine se prema polumjeru zakrivljenja dijele na:

- horizontalne bušotine malog polumjera zakrivljenja;
- horizontalne bušotine srednjeg polumjera zakrivljenja;
- horizontalne bušotine velikog polumjera zakrivljenja.

Horizontalne bušotine malog polumjera zakrivljenja imaju porast kuta otklona od 5 do 10˚/0,9144 m (5 do 10˚/3 ft) što omogućava polumjer zakrivljenja od 6,096 do 12,192 m (20 do 40 ft) . Duljina horizontalne sekcije varira između 274,32 i 60,96 m (200 do 900 ft). Bušotina malog polumjera zakrivljenja se buše uz primjenu posebnih bušaćih alatki i tehnika. Ovaj profil kanala se najčešće buši kao re-entry iz postojećeg kanala bušotine (PetroWiki 2015b). Podjela horizontalnih bušotina s obzirom na polumjer zakrivljenja prikazana je u tablici 2-1, i na slici 2-2. Podaci se neznatno razlikuju ovisno o izvoru iz koje su preuzeti.

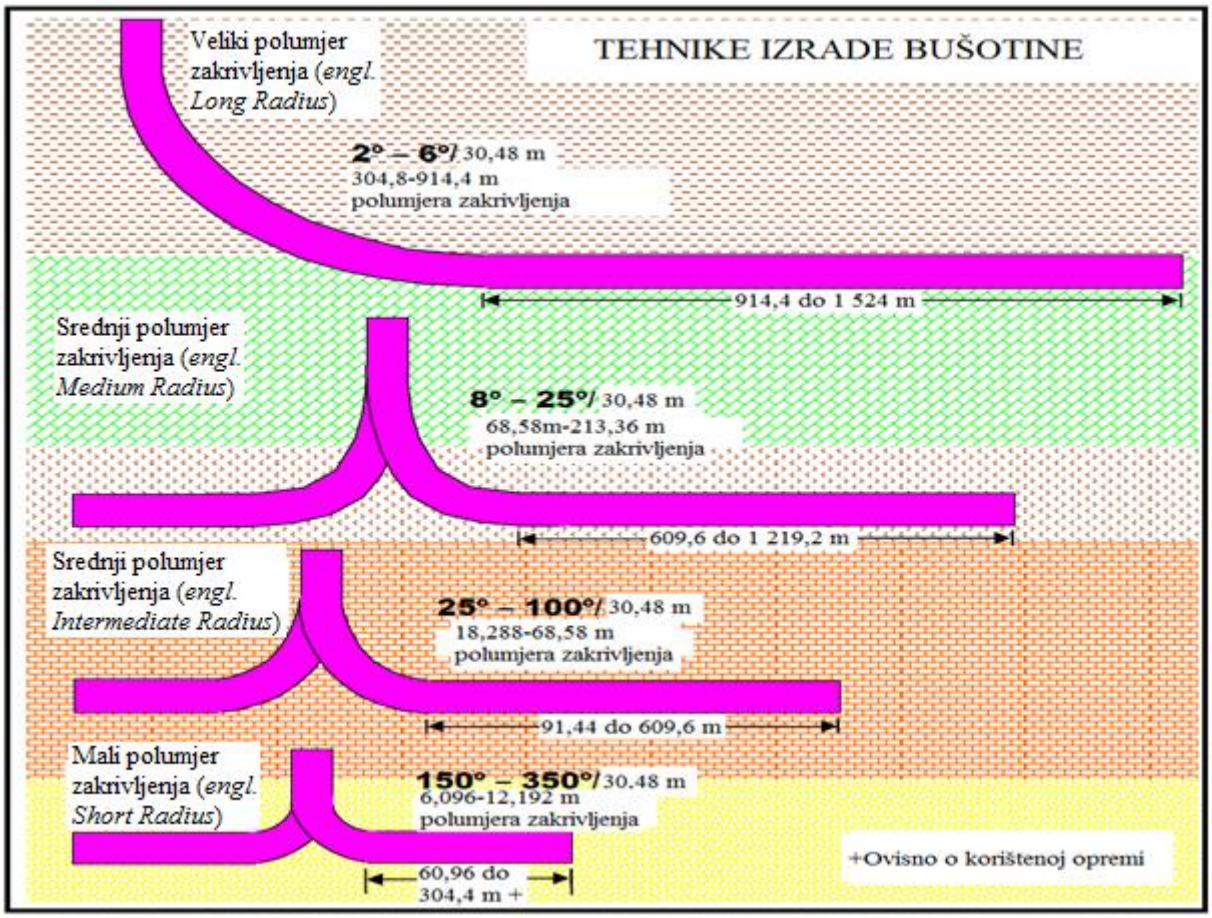
Horizontalne bušotine srednjeg polumjera zakrivljenja imaju porast kuta otklona od 6 do 35˚/30,48 m (6 do 35˚/100 ft), a polumjer zakrivljenja od 48,77 m do 304,8 m (160do 1000 ft). Ove bušotine se izrađuju uz primjernu specijalnih dubinskih uronjenih motora (*engl. mud motors*) i konvencionalnog sastava bušaćeg alata. Dvostruki savijajući sklopovi (*engl. double-bend assemblies*) su dizajnirani za postizanje kuta otklona do 35˚/30,48 m (35˚/100 ft). Horizontalna sekcija se često buši uz primjenu konvencionalnog sklopa upravljivih dubinskih motora. Ovaj tip horizontalne bušotine čest je kod bušenja na kopnu i re-entry horizontalnog bušenja. U praktičnom smislu, bušotina je klasificirana kao bušotina srednjeg polumjera zakrivljenja ako dubinski bušaći sklop (*engl. bottom hole assembly-BHA*) ne može rotirati cijelo vrijeme kroz sekciju gdje dolazi do porasta kuta (PetroWiki 2015b).

Horizontalne bušotine velikog polumjera zakrivljenja karakterizira porast kuta otklona od 2 do 6˚/30,48 m (2 do 6˚/100 ft), što rezultira polumjerom zakrivljenja od 304,8 do 914,4 m (1000 do 3000 ft). Ovaj dio kanala izrađuje se konvencionalnim alatima za koso usmjereno bušenje, a duljina horizontalnog dijela kanala iznosi i do 2 348,4 m (8 000 ft). Ovaj profil kanala je dobro prilagođen za primjenu u slučajevima u kojima je potreban dugi, horizontalni pomak dna bušotine za dostizanje točke ulaska u ležište (*engl. „entry point"*). Upotreba rotirajućih upravljivih sustava (*engl. RSS-rotary steerable system*) može

biti potrebna za bušenje izrazito duge horizontalne sekcije jer bušenje s upravljivim motorom u kliznom načinu rada nije moguće (PetroWiki 2015b).

Tablica 2-1. Podjela horizontalnih bušotina (Gaurina-Međimurec, 2014)

Tip bušotine (Well Type)	Porast kuta (Build rate)	Polumjer zakrivljenja (Radius)	Horizontalni doseg (Lateral section)	Bušenje horizontalne sekcije
	°/30m	m	m	
Dugi polumjer zakrivljenja (long radius)	2-6	900-300	<2400	RSS (bušotine velikog dosega)
srednji polumjer zakrivljenja (medium radius)	6-35	300-50	<2400	Klasični upravljivi motor (bušenje na kopnu i re-entry horizontalne)
Kratki polumjer zakrivljenja (short radius)	150-300	12-6	40-20	Posebne alatke i tehnike (re-entry iz postojeće bušotine)



Slika 2-1. Podjela horizontalnih bušotina s obzirom na polumjer zakrivljenja (Gaurina-Međimurec, 2014)

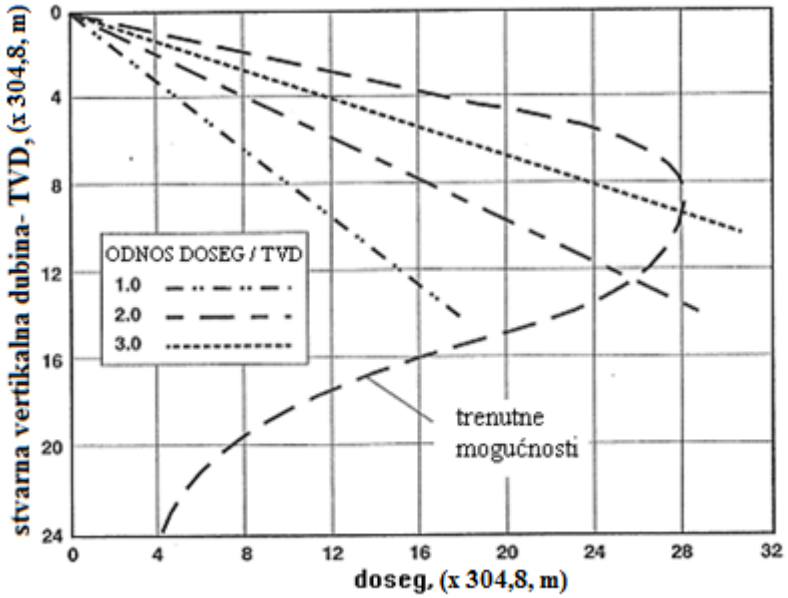
3. KLASIFIKACIJA BUŠOTINE

Na slici 3-1 prikazana je klasifikacija bušotina s obzirom na odnos dosega i stvarne vertikalne dubine (TVD) (Gaurina-Međimurec, 2014):

•konvencionalne usmjerene bušotine → doseg/TVD manji od 2,

•bušotine velikog dosega → doseg/TVD između 2 i 3,

•bušotine izuzetno velikog dosega → doseg/TVD veći od 3.



Slika 3-1. Odnos stvarne vertikalne dubine (TVD) i dosega (Gaurina-Međimurec, 2014)

Specifičnost izrade bušotina velikog dosega su (Gaurina-Međimurec 2014):

•veliki okretni moment i nateg bušaćih alatki (*engl. torque and drag*),

•otežano usmjereno bušenje,

•otežano čišćenje kanala bušotine i

•gubitak isplake.

Za uspješnu izradu bušotina velikog dosega bitni parametri su (Gaurina-Međimurec, 2014):

•izbor niza bušaćih alatki,

•usmjereno bušenje,

•izbor isplake i

•primjena specifičnih tehnologija ugradnje kolone zaštitnih cijevi.

4. OTKLANJANJE KANALA BUŠOTINE

Otklanjanje kanala bušotine postiže se korištenjem (Gaurina-Međimurec 2014):

- klinova (*engl. whipstocks*),
- mlaznog bušenja (*engl. jetting*),
- rotirajućih bušaćih sklopova (BHA),
- sklopa alatki na dnu bušotine (*engl. bottomhole assembly (BHA) configurations*; često uključuje uronjeni motor, sklop za usmjereno bušenje i mjerenje, (*MWD-engl. measurements-while drilling tools*), alatke (sonde) za karotažna ispitivanja tijekom bušenja (*LWD-engl. logging-while-drilling tools*) i ostale specijalne uređaje);
- upravljivih motora *(engl. conventional steerable motor assemblies).*

Upravljivi dubinski motori (*engl. steerable downhole motor assemblies*) i mjerni uređaji razvijeni su sredinom 1970-tih.

4.1. Klinovi

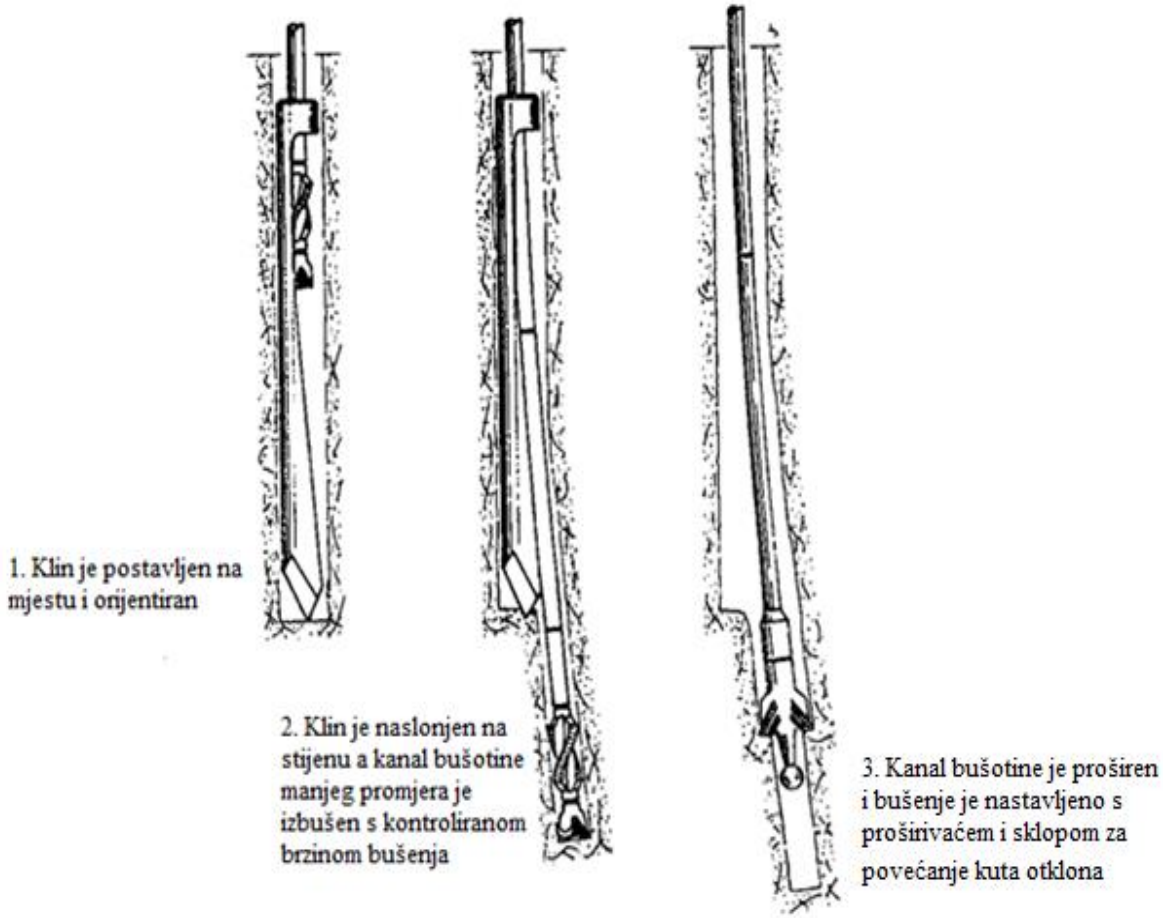
Klinovi (*engl. whipstock*) su jedna od najstarijih alatki za skretanje kanala. Klin za skretanje jednostavne je konstrukcije i jedina je alatka koja se jednako uspješno može upotrijebiti u stijenama svih vrsta. On omogućuje orijentiranje i usmjeravanje bušaćih alatki, odnosno kanala bušotine u željenom pravcu.

Kod korištenja klina, za otklanjanje kanala bušotine kao što je prikazano na slici 4-2, bušaći sklop se izvlači na površinu, a klin se spušta u bušotinu te se orijentira i postavlja na željeno mjesto a zatim primjenom opterećenja učvršćuje na dnu kanala (slika 4-2 pozicija 1). Primjenom opterećenja lomi se zatik i istovremeno oslobađa dlijeto malog promjera te se pažljivo nastavlja bušenje kanala bušotine manjeg promjera s kontroliranom brzinom bušenja (slika 4-2 pozicija 2). Nakon izbušenih pet do šest metara kanala bušotine dlijeto i klin se izvlače iz kanala bušotine, nakon čega se povećava promjer kanala bušotine korištenjem novog sklopa za povećanje kuta otklona i promjera bušotine (slika 4-2 pozicija 3) (Nguyen, 1996).

Postoje stalni slika 4-1 i uklonjivi klinovi (Gaurina-Međimurec 2014).



Slika 4-1. Primjer klina za skretanje (Gaurina-Međimurec, 2014)

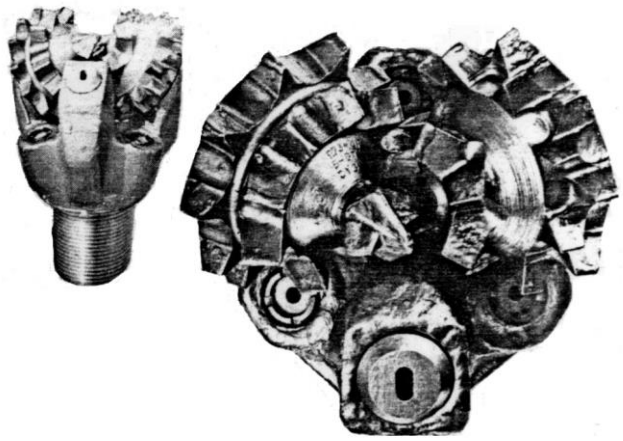


Slika 4-2. Otklanjanje kanala bušotine pomoću klina (Nguyen, 1996)

4.2. Skretanje mlazom

Učinkovito samo kod bušenja mekih naslaga. Skretanje kanala bušotine djelovanjem mlaza predstavlja prvi upravljivi sklop (Gaurina-Međimurec, 2014).

Tijekom mlaznog bušenja bušaći niz ne rotira da se ostvari promjena putanje kanala. Nakon skretanja (mlaznog bušenja) započinje rotacija niza bušaćih alatki i bušenje se nastavlja (Gaurina-Međimurec, 2014). Na slici 4-3 prikazano je dlijeto za usmjereno bušenje s produljenom mlaznicom.



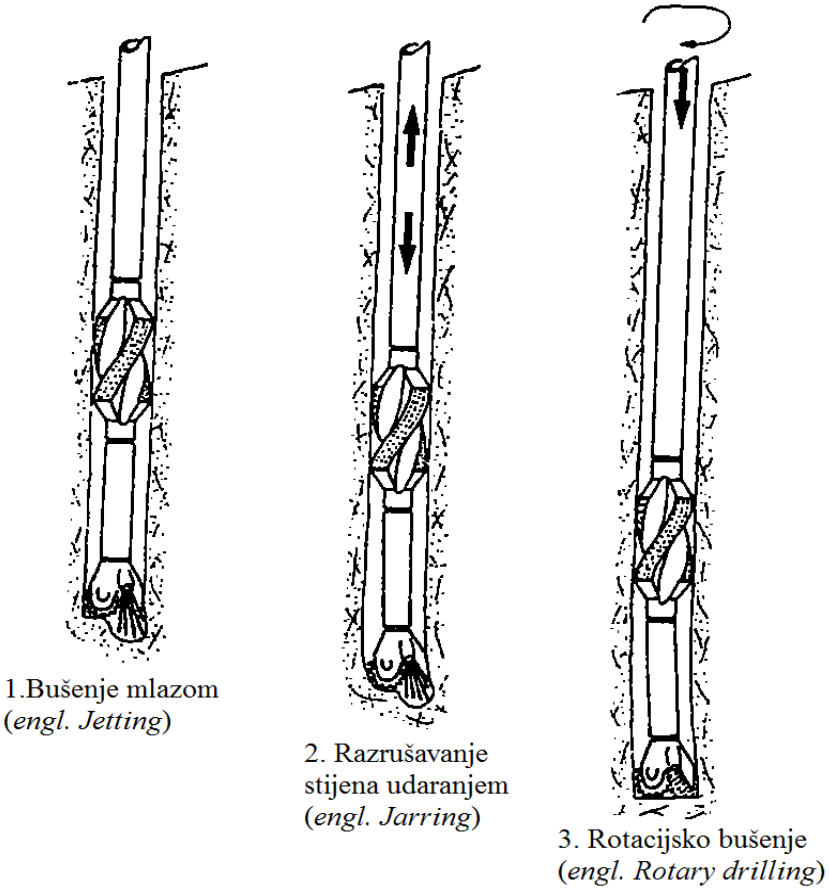
Slika 4-3. Dlijeto za usmjereno bušenje s produljenom mlaznicom (Gaurina-Međimurec, 2014)

Ova tehnika je isplativa i pogodna za bušenje mekih formacija velike bušivosti (preko 20 m/h), a sastoji se od:

- bušaćeg dlijeta s jednom mlaznicom, dvije mlaznice (ako postoji dva konusa), ili tri mlaznice s jednom glavnom mlaznicom velikog promjera,
- stabilizatora blizu dlijeta jednakog promjera kao i dlijeto, i
- nemagnetske teške šipke.

Nakon orijentiranja glavne mlaznice, pumpe se podešavaju tako da brzina strujanja fluida iz glavne mlaznice iznosi otprilike 120 m/s. Cilj je razrušiti formaciju brzinom strujanja isplake (*engl. jetting*) (slika 4-4 pozicija 1). Bušaće dlijeto je postavljeno na dno s malom težinom radi izbjegavanja bilo koje promjene azimuta tijekom utiskivanja isplake. Bušać podiže malo niz s dlijetom i zatim ga otpušta (*engl. jarring*) (slika 4-4 pozicija 2) tako da ostvari opterećenje od nekoliko tona na dnu kanala bušotine dok ne prestane prodiranje u stijenu. Zatim je rotacija nastavljena s maksimalnom težinom (slika 4-4 pozicija 3) i

izbušen je kanal bušotine duljine jedne bušaće šipke kao što je prikazano na slici 4-4 (Nguyen, 1994).

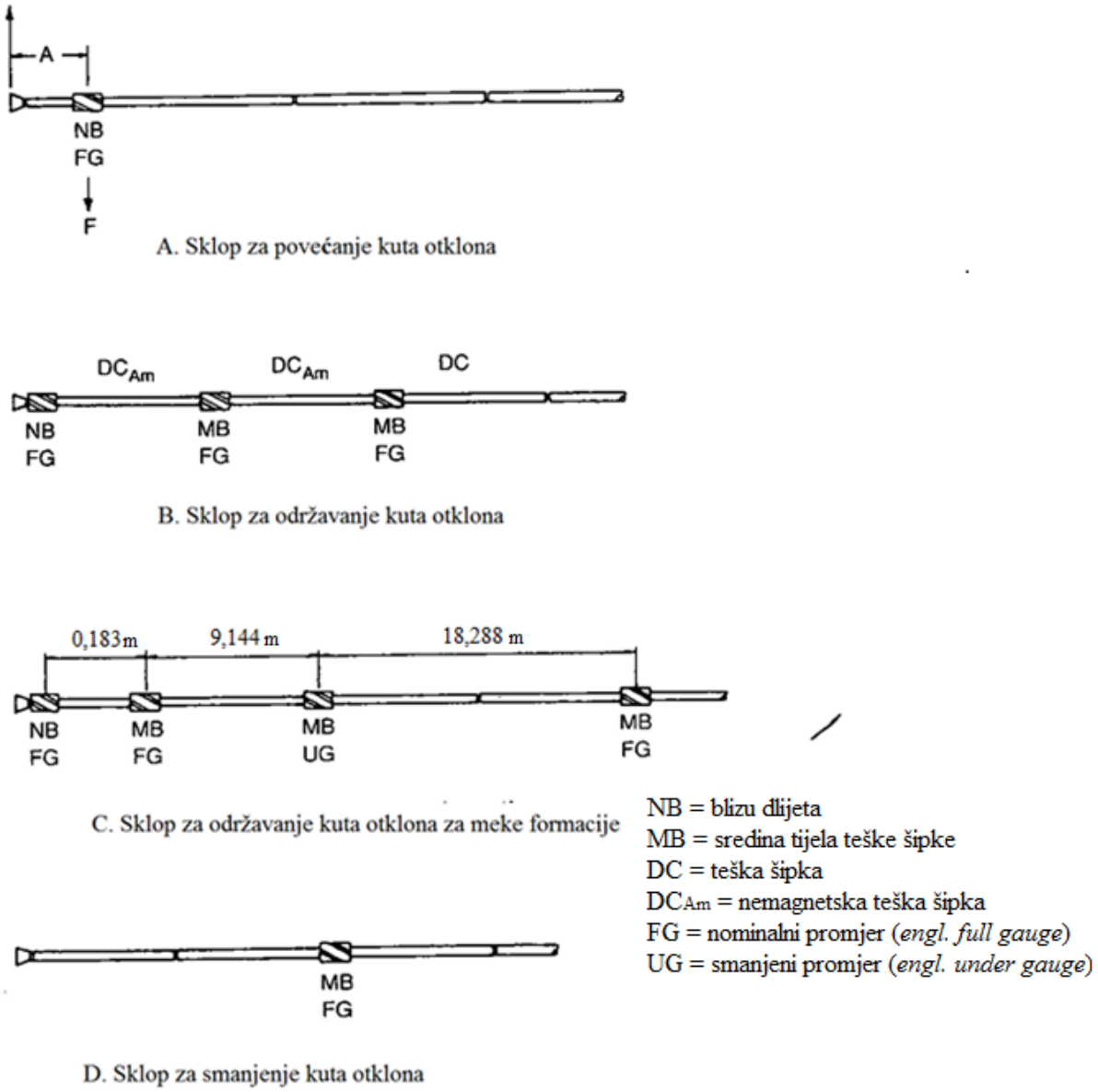


Slika 4-4. Način razrušavanja stijene mlaznim bušenjem (Nguyen, 1996)

4.3. Rotirajući bušaći sklopovi u usmjerenim bušotinama

Kut otklona može se povećati, smanjiti ili održati tijekom bušenja korištenjem stabilizatora postavljenih na odgovarajućim mjestima na prvih 30 metara šipki. Gornje teške šipke uglavnom služe za ostvarivanje opterećenja na dlijeto (Nguyen, 1996).

Sastoji se od dlijeta, teških šipki, stabilizatora, proširivača, prijelaznih komada i drugih alatki koje se nalaze ispod bušaćih šipki. Postoji sklop za povećanje kuta otklona, sklop za zadržavanje kuta otklona te sklop za smanjenje kuta otklona kao što je prikazano na slici 4-5.



Slika 4-5. Rotirajući bušaći sklopovi (Nguyen, 1996)

4.3.1. Sklop za povećavanje kuta otklona

Sklop za povećanje kuta otklona (*engl. buildup assembly*) je prikazan na slici 4-5 A. U sastavu ima stabilizator iznad dlijeta, standardnu i nemagnetsku tešku šipku, što uzrokuje povećanje kuta otklona koji ovisi o primijenjenom opterećenju na dlijeto, brzini rotacije te o udaljenosti između dlijeta i stabilizatora. Ona je uglavnom 1,5 m. Na slici 4-5 A navedena udaljenost je označena slovom A (Nguyen, 1996).

4.3.2. Sklop za održavanje kuta otklona

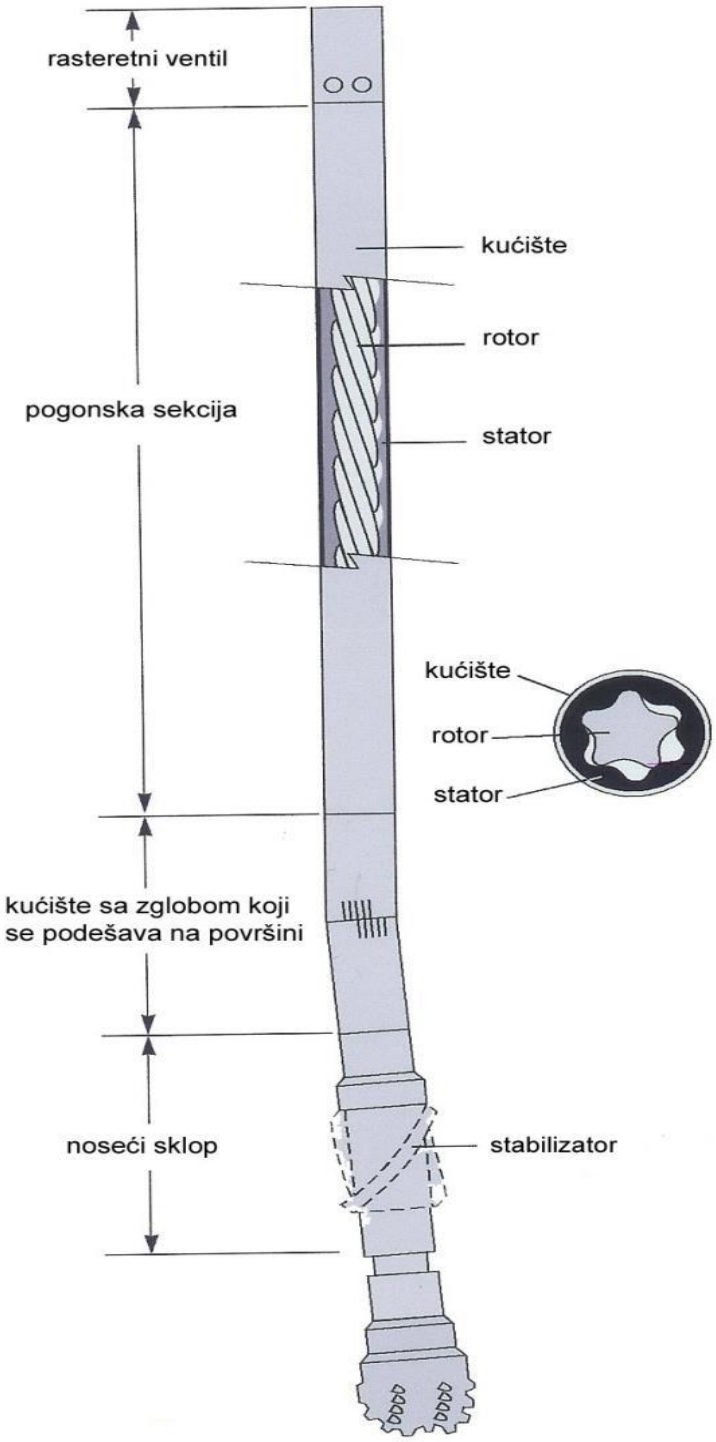
Održavanje kuta otklona često vremenski traje najdulje i najviše je problematično. Sklop za održavanje kuta otklona (*engl. stabilized assembly*) mora biti krut i što je moguće ravniji, te se zbog toga postavljaju tri stabilizatora po jedan na svaki kraj nemagnetske teške šipke te jedan između njih kao što je prikazano na slici 4-5 B. Ako je formacija meka, smanji se promjer stabilizatora. Takav sklop je prikazan na slici 4-5 C (Nguyen, 1996).

4.3.3. Sklop za smanjenje kuta otklona

Sklop za smanjenje kuta otklona (*engl. drop-off assembly*) je tipično njihalo (*engl pendular*) a koristi se i kod održavanja vertikalnosti u vertikalnoj bušotini. Takav sklop je prikazan na slici 4-5 D (Nguyen, 1996).

4.4. Upravljivi motor s podesivim kućištem

Upravljivi motor s podesivim kućištem (*engl. Bent-Housing Steerable Motor*) prikazan na slici 4-6 ili motor velikog izlaznog okretnog momenta ima kućište s mogućnošću podešavanja kuta od 0˚do 3˚, što daje ekvivalentan otklon osi dlijeta u odnosu na os bušotine (Gaurina-Međimurec, 2014).



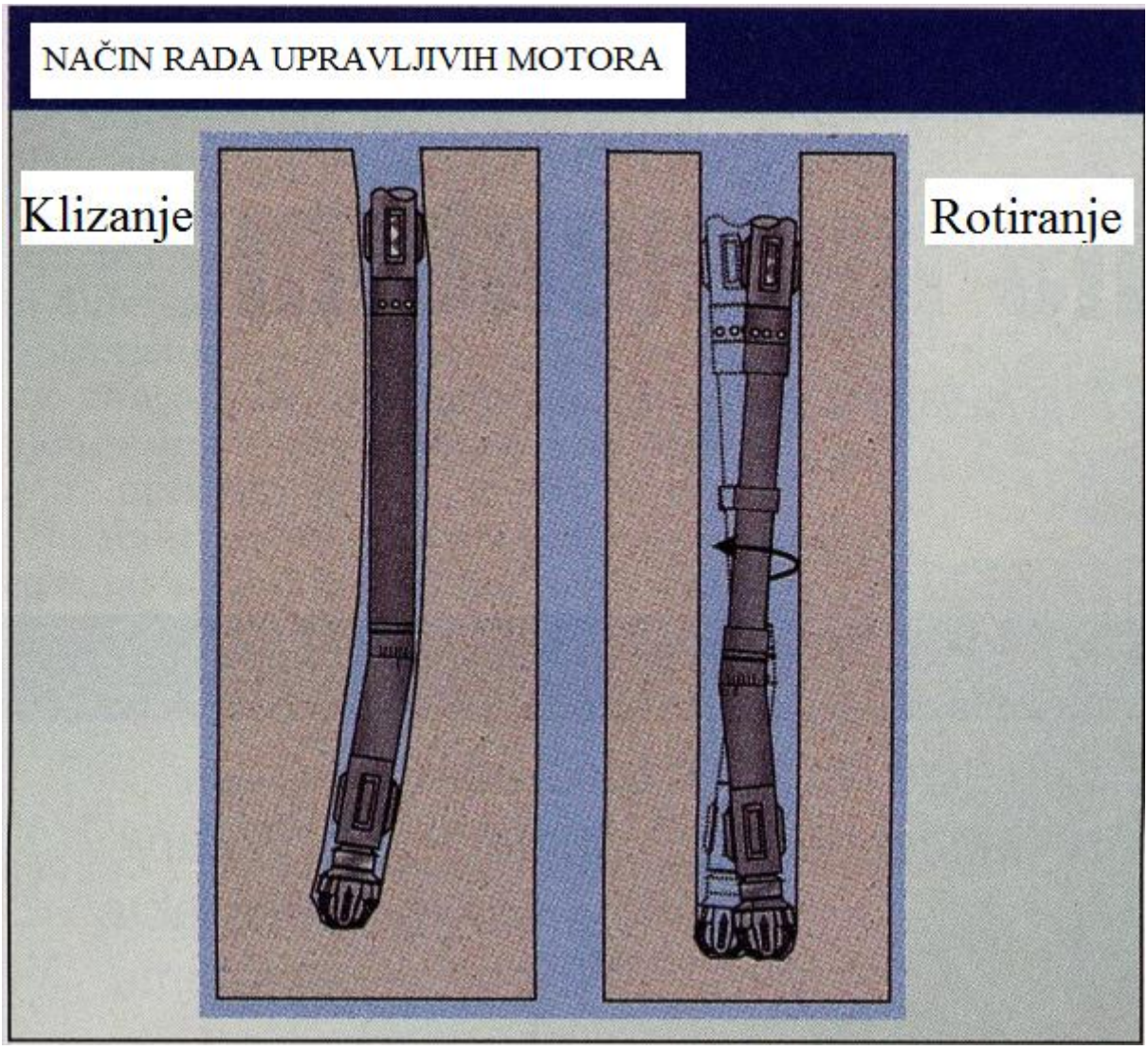
Slika 4-6. Upravljivi motor s podesivim kućištem (Gaurina-Međimurec, 2014)

Glavni faktori kontrole putanje dlijeta kod upravljivog motora su (Gaurina-Međimurec, 2014):

1. kut podesivog kućišta,
2. promjer i položaj stabilizatora neposredno iznad dlijeta,
3. promjer i položaj stabilizatora koji se nalazi iznad motora i,
4. međudjelovanje dlijeta i formacije.

Na slici 4-7 prikazan je način rada upravljivih motora (Gaurina-Međimurec, 2014):

1) upravljivi motor u kliznom (*engl. sliding*) načinu rada i,
2) upravljivi motor u rotirajućem (*engl. rotating*) načinu rada.



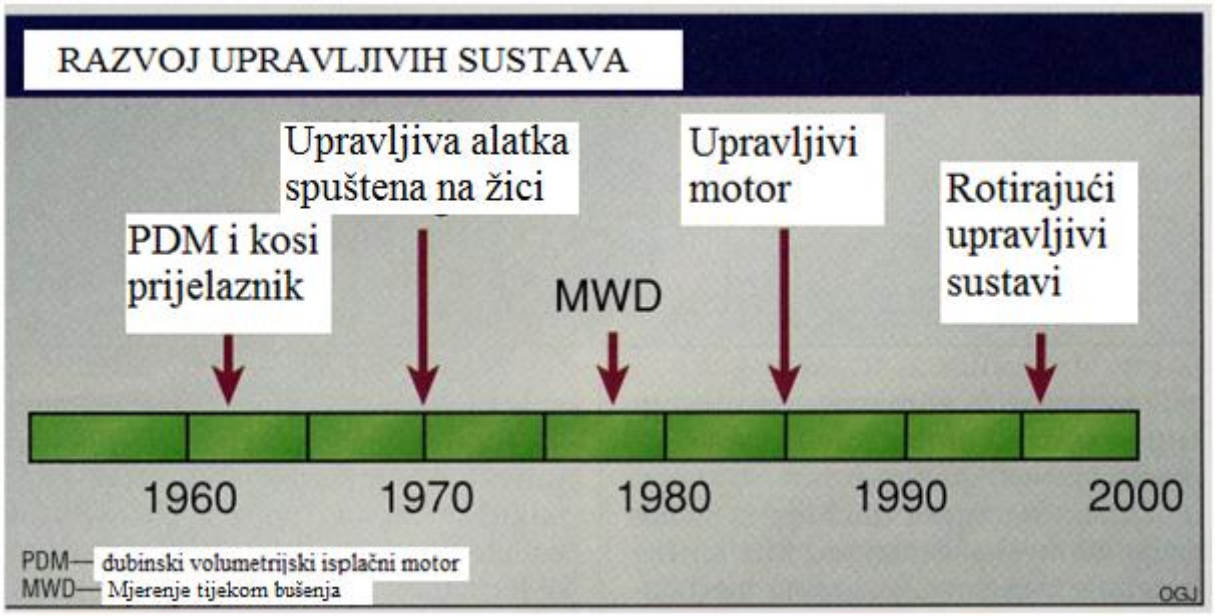
Slika 4-7. Način rada upravljivih motora pri kliznom odnosno rotirajućem načinu rada (Gaurina-Međimurec, 2014)

4.5. Rotirajući upravljivi sustavi

Upravljivi sustav (*engl. steerable system*) se koristi kad bušenje usmjerenih, horizontalnih ili bušotina velikog dosega. Upravljivi sustav ima minimalnu interakciju s kanalom bušotine, te na taj način čuva kvalitetu kanala bušotine (Gaurina-Međimurec, 2014).

Napredne verzije upravljivih sustava ostvaruju konstantnu bočnu silu, slično klasičnim stabilizatorima koji rotiraju s nizom alatki ili orijentiraju dlijeto u željenom smjeru, tijekom kontinuirane rotacije pri istom broju okretaja u minuti kao i niz alatki (Gaurina-Međimurec, 2014).

Razvoj upravljivih sustava prikazan je na slici 4-8.



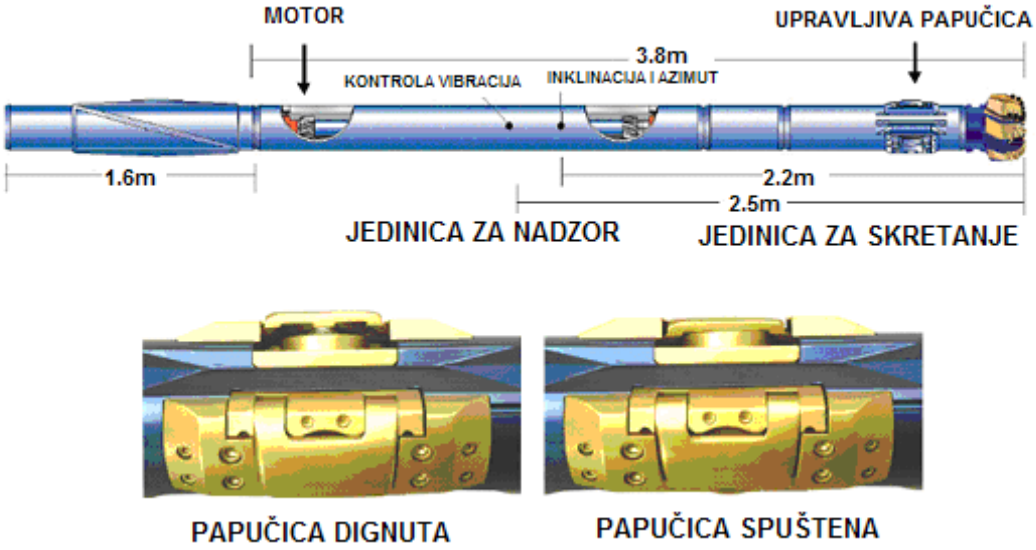
Slika 4-8. Razvoj upravljivih sustava kroz godine (Gaurina-Međimurec, 2014)

Prema principu rada rotirajući upravljivi sustavi se dijele na (Gaurina-Međimurec, 2014):

1) sustav koji "gura" dlijeto (*engl. Push the bit*) i
2) sustav koji upravlja dlijetom preko zglobne osovine (*engl. Point the bit*).

4.5.1. "Push the bit" sustav

Sustav koji „gura" dlijeto upravlja dlijetom jednostavnim dodavanjem bočnog opterećenja na dlijeto preko izvlačivih papuča neposredno iznad dlijeta kao što je prikazano na slici 4-9. Sustavi koji rade na ovom principu koriste kratka dlijeta duljine do 0,0508 m (2") zbog čega sustav lakše skreće, ali su češće potrebni popravci putanje pa kanal bušotine nekad poprima spiralni oblik (Gaurina-Međimurec, 2014). Na slici 4-9 prikazan je način rada „push the bit" sustava.

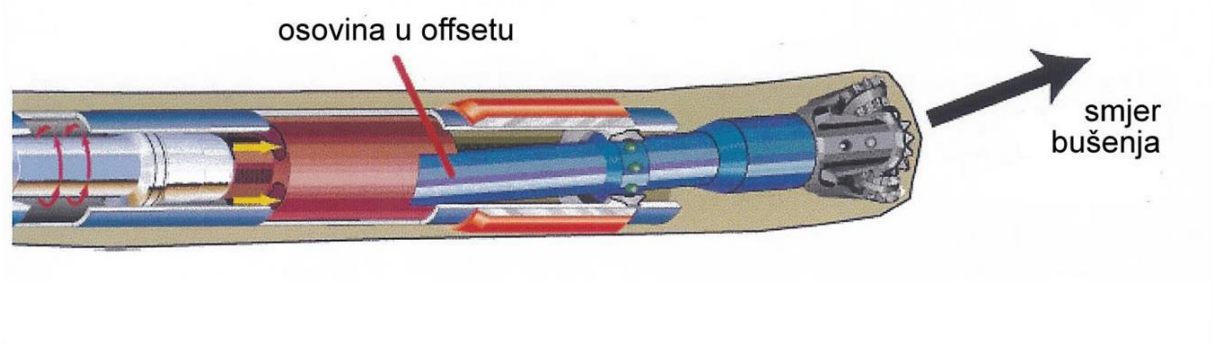


Slika 4-9. Način rada „push the bit“ sustava (Gaurina-Međimurec, 2014)

4.5.2. "Point the bit" sustav

Lice dlijeta je usmjereno u željenom smjeru i nije potrebno bočno opterećenje kao sto je prikazano na slici 4-10.

Prednost sustava je dulje dlijeto, čime se izbjegava efekt spirale, a nedostatak je sporija reakcija na promjene u odnosu na "push the bit" (Gaurina-Međimurec, 2014).



Slika 4-10. Način rada „point the bit“ sustava (Gaurina-Međimurec, 2014)

5. KONSTRUKCIJA BUŠOTINE

Kanal horizontalne bušotine obično se dijeli na slijedeće sekcije (dijelove):

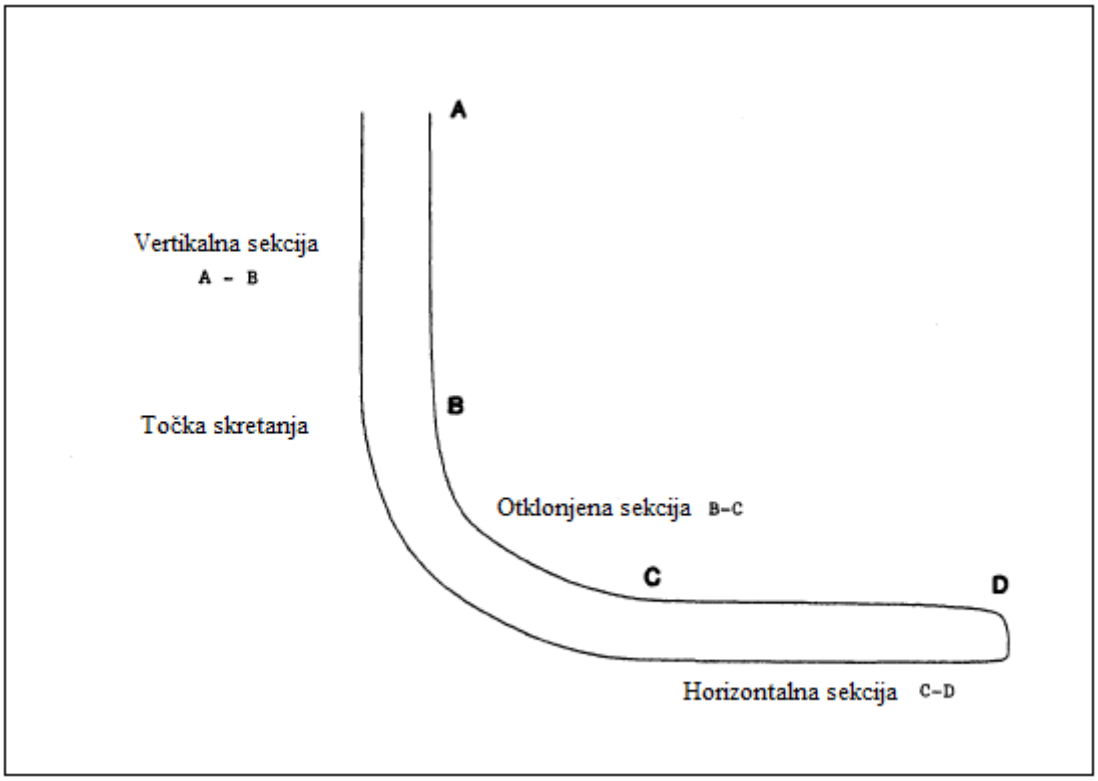
a) vertikalna sekcija (dio) A-B,

b) otklonjena sekcija (dio), B-C i

c) horizontalna (vodoravna) sekcija (dio) C-D.

Za određivanje naprezanja i sila u nizu zaštitnih cijevi pri ugradnji u horizontalne bušotine potrebno je definirati i određene referentne točke, kako je prikazano na slici 5-1. To su:

- ušće bušotine (A),
- točka skretanja (B),
- kraj otklonjenog dijela odnosno početak horizontalnog dijela kanala (C) i
- krajnja točka bušotine (D).



Slika 5-1. Dijelovi kanala horizontalne bušotine (El-Sayed et al., 1991)

Pri spuštanju bušaćih alatki u horizontalni dio (C-D na slici 5-1) kanala bušotine one su izložene djelovanju tlačne sile kao posljedice trenja pri ugradnji. Ta tlačna sila najveća je na kraju otklonskog dijela kanala bušotine (točka C), a najmanja na najdaljoj točci cijevi

u horizontalnom dijelu (točka D). Kada je ostvarena tlačna sila koja premašuje kritičnu silu izvijanja, alatke se prvo izvijaju sinusoidalno, a zatim spiralno. U krajnjem slučaju dosezanja naprezanja koja premašuju dozvoljeno naprezanje materijala do granice tečenja ostvaruje se trajna deformacija cijevi. Ukoliko je trenje ili tlačna sila zbog trenja veća od kritične sile spiralnog izvijanja moguće je uklinjenje izvijene cijevi i nemogućnost dosezanja krajnje točke vodoravnog dijela kanala bušotine (Matanović, 2014).

Sinusoidalno izvijanje cijevi nastaje kada se dosegne kritična sila sinusoidalnog izvijanja (Matanović, 2014):

$$F_{cr} = 2 \cdot \left(\frac{E \cdot I \cdot w' \cdot \sin\theta}{R} \right)^{0,5} \tag{5-1}$$

gdje su:

F_{cr} - kritična sila sinusoidalnog (valovitog) izvijanja, N

w' - težina niza po jedinici duljine kada je uronjen u fluide, $N.m^{-1}$

θ - otklon kanala bušotine, °

E - youngov modul elastičnosti, Pa

I – polarni moment otpora , m^4

R- zračnost između tubinga i zaštitnih cijevi, m

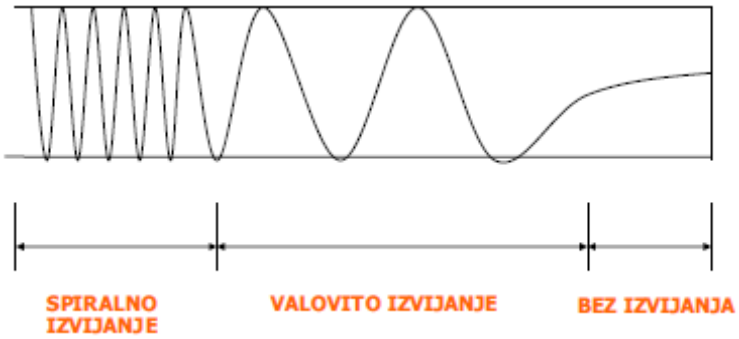
Kada uzdužna sila dostigne vrijednost kritične sile spiralnog izvijanja F_{hel}, ostvaruje se spiralno izvijanje cijevi (Matanović, 2014). Ona je približno 1,8 puta veća od kritične sile sinusoidalnog izvijanja.

$$F_{hel} = 2 \cdot \left(2 \cdot 2^{0,5} - 1 \right) \cdot \left(\frac{E \cdot I \cdot w' \cdot \sin\theta}{R} \right)^{0,5} \tag{5-2}$$

gdje je:

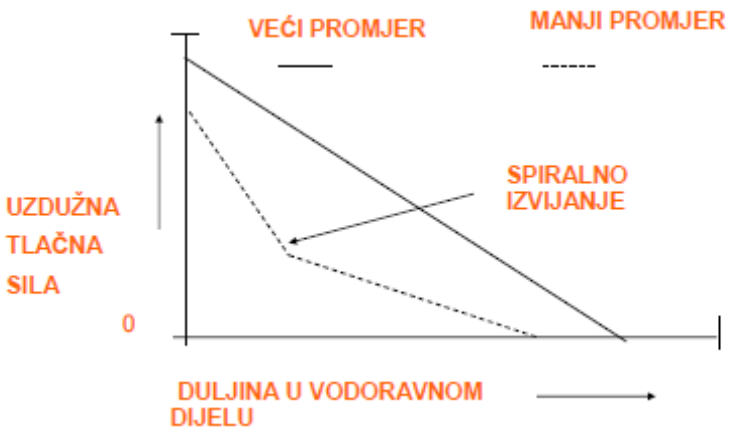
F_{hel} - kritična sila spiralnog izvijanja, N

Način izvijanja cijevnih alatki u vodoravnom dijelu kanala bušotine prikazano je slikom 5-2.



Slika 5-2. Način izvijanje cijevnih alatki u vodoravnom dijelu kanalu bušotine (Matanović, 2014)

Razdioba tlačne sile u cijevima u vodoravnom dijelu kanala bušotine prikazano je slikom 4-3.



Slika 5-3. Razdioba tlačne sile u cijevima u vodoravnom dijelu kanala bušotine (Matanović, 2014)

U otklonjenom dijelu kanala bušotine (dio B-C sa slike 5-1), cijevne alatke će uz primjenu uzdužne sile biti potiskivane uz donju stranu zakrivljenog kanala bušotine. Zbog geometrije sustava, stvarna tlačna sila u tom dijelu kanala bušotine najčešće ne prelazi vrijednosti kritične sile izvijanja, pa u tom dijelu kanala bušotine alatke najčešće nisu spiralno izvijene (Matanović, 2014).

Specifične pojave za ovaj dio kanala bušotine su (Matanović, 2014):

- da se tangencijalna komponenta uzdužne sile dijeli ravnomjerno po cijeloj duljini cijevnih alatki u otklonjenom dijelu i potiskuje ih uz donju stranu (stijenku) kanala bušotine, čime je otežano izvijanje,

- druga je pojava vezana uz sam oblik ovog dijela kanala bušotine, tako što donja strana otklonjenog dijela ima veću duljinu, pa premještanje (izvijanje) iz ovog položaja zahtijeva viši stupanj izvijanja, odnosno veći iznos tlačne sile, nego je potrebno u ravnom dijelu kanala bušotine istog promjera.

U vertikalnom dijelu kanala bušotine (dio A-B na slici 5-1) tlačna sila u nizu cijevi pojavljuje se kada se smanji vlačnu silu na kuki (otpuštamo teret na površini), kako bi se postiglo određenu vrijednost tlačne sile u točci skretanja. Ona je potrebna za ostvarivanje tlačne sile na vrhu niza koji je ugrađen u vodoravnom dijelu ili zbog samog potiskivanja cijevi kroz otklonjeni i vodoravni dio kanala bušotine (Matanović, 2014).

5.1. Dizajn i opterećenja zaštitnih cijevi

Nezacijevljena bušotina (*engl. open hole completion*) ima nekoliko nedostataka (El-Sayed et al., 1991):

Ona ograničuje proizvodnju zbog problema stabilnosti kanala bušotine i zbog mogućnosti zarušavanja kanala. Studije koje su proučavale ovaj problem su pokazale da postoji određena granica do koje se može ostvariti tlak na dno i depresija na sloj. Što više opremanje nezacijevljene bušotine ne dozvoljava upotrebu mehaničkih metoda podizanja kapljevine iz horizontalnih bušotina. Da bi smanjili nedostatke opremanja ostavljanjem kanala bušotine otvorenim, u horizontalnim bušotinama preporučuje se ugradnja kolone zaštitnih cijevi i njihova cementacija (El-Sayed et al., 1991).

Dizajn zaštitnih cijevi za horizontalne bušotine kao i za konvencionalne bušotine, ovisi o opterećenjima kojima su podvrgnute zaštitne cijevi. Opterećenja zaštitnih cijevi u horizontalnim bušotinama nisu različita od onih koji se javljaju u zaštitnim cijevima u konvencionalnim bušotinama. Međutim postoji izrazita razlika u veličini tih opterećenja. Najkritičnija opterećenja primijenjena na zaštitnim cijevima u horizontalnim bušotinama su: opterećenje na savijanje (*engl. bending load*), torzija i nateg, te opterećenje uslijed

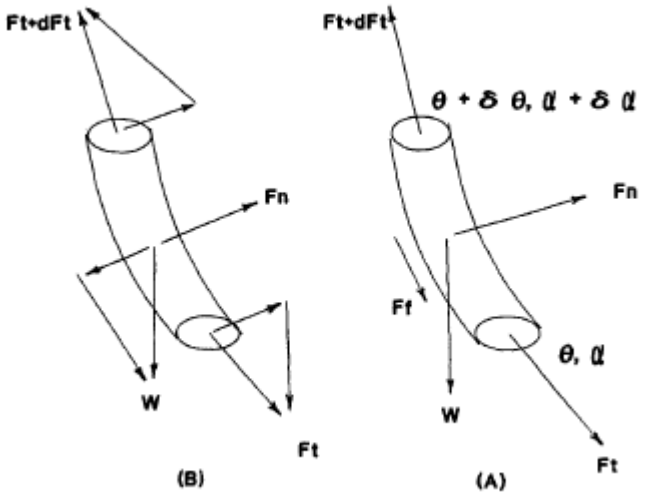
slijeganja naslaga pod djelovanjem geostatičkog tlaka (*engl. formation subsidence*). Osim toga, intenzitet perforiranja može smanjiti otpornost zaštitnih cijevi na rasprskavanje (*engl. crushing resistance*). Ovi faktori mogu biti značajniji od tradicionalnih parametara kao što su otpornost na rasprskavanje (unutarnje naprezanje), otpornost na gnječenje (*engl. collapse*), i vlak koji se koriste pri konvencionalnoj proceduri dizajniranja niza zaštitnih cijevi (El-Sayed et al., 1991).

Prema trajektoriji bušotine, putanje kanala bušotina može biti podijeljeno na tri dijela: horizontalna sekcija, otklonjena sekcija i vertikalna sekcija (slika 5-1). Svaka od ovih sekcija ima svoje uvjete opterećenja.

5.1.1. Naprezanja u horizontalnoj sekciji

Trajektorija kanala bušotine u horizontalnoj sekciji je horizontalna ili približno horizontalna, ovisno o kutu otklona kanala. Kut otklona kanala horizontalne bušotine nalazi se između 80˚ i 90˚ ovisno o kutu nagiba ležišta. Osim osnovnih vlačnih i tlačnih opterećenja koje se javljaju kod izrade konvencionalnih bušotina, zaštitne cijevi u ovoj sekciji su podložne torziji i nategu, utjecaju perforiranja na otpornost gnječenje, i na utjecaju slijeganja formacije (El-Sayed et al., 1991).

Torzija i nateg mogu u potpunosti biti uzrokovani silama trenja tijekom klizanja (ugradnje) (*engl. sliding friction forces*) zbog kontakta cijevi sa stijenkama kanala bušotine. Dva faktora utječu na trenje zaštitnih cijevi o kanalu bušotine tijekom ugradnje, okomita kontaktna sila (Fn na slici 5-4) (najčešće težina cijevi) i koeficijent trenja između zaštitnih cijevi i stijenki kanala bušotine (μ). Umnožak ova dva faktora ($Fn \cdot \mu$) predstavlja silu trenja tijekom klizanja. Uobičajena kontaktna sila između kolone zaštitnih cijevi i stijenki kanala bušotina ovisi o težini cijevi i o vlačnom i tlačnom opterećenju primijenjenom na zaštitnim cijevima. Vrijednost koeficijenta trenja tijekom klizanja (ugradnje) (*engl. sliding friction factor*) ovisi o vrsti dodirnih površina i stupnju podmazivanja na različitim područjima u kanalu bušotine, te uglavnom o vrsti isplake (El-Sayed et al., 1991).



Slika 5-4. Prikaz sila koje djeluju na cijevi, (A) prikaz element cijevi, (B) prikaz opterećenja (El-Sayed et al., 1991)

Na temelju slike 5-4, veličine okomite sile (*engl. normal force*) koja je primijenjena na cijevi može se izračunati koristeći slijedeće jednadžbe kako slijedi (El-Sayed et al., 1991):

$$F_n = \{(F_t \cdot \delta\alpha \cdot \sin\theta^\circ)^2 + (F_t \cdot \delta\theta + W \cdot \sin\theta^\circ)^2\}^{1/2} \quad (5\text{-}1)$$

a povećanje vlačnog opterećenja (δF_t) u bilo kojem elementu je:

$$\delta F_t = W \cdot \cos\theta \mp \mu \cdot F_n \quad (5\text{-}2)$$

a povećanje torzije (δM) je

$$\delta M = \mu \cdot F_n \cdot r \quad (5\text{-}3)$$

gdje su:

F_n- normalna (okomita) sila koja djeluje na element, N

Ft- aksijalna vlačna sila na donjem kraju elementa, N

θ – kut otklona kanala bušotine, ° ili radijan

$\delta\alpha$ – povećanje kuta azimuta, ° ili radijan

$\delta\theta$ – povećanje kuta otklona, ° ili radijan

W- težina elementa cijevi u isplaci, N

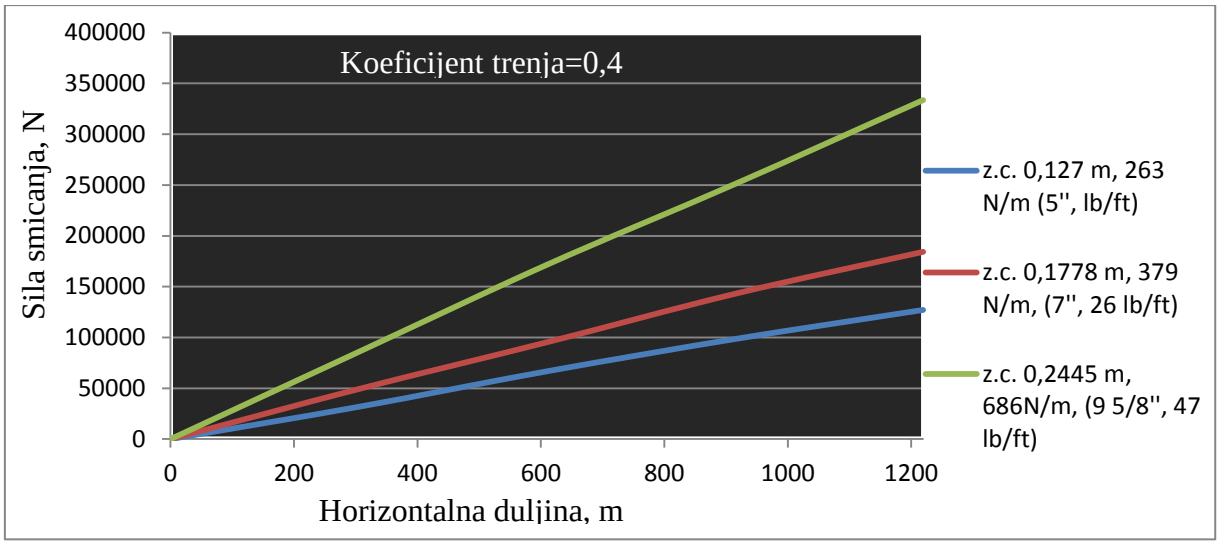
μ- koeficijent trenja zbog klizanja između zaštitnih cijevi i kanala bušotine, -

M- torzija na donjem kraju elementa cijevi, Nm

U jednadžbi 5-2 znak plus ili minus označava smjer kretanje cijevi gore ili dolje, znak plus je za kretanje prema gore gdje se trenje pridodaje aksijalnom opterećenju, a znak minus je za kretanje cijevi prema dolje. Vrijednost koeficijenta trenja kreće se između 0,2 i 0,4 ovisno o tipu isplake u kanalu bušotine i vrsti formacije. Korištenjem računalnog programa, sile natega se određuju za horizontalnu sekciju, za otvorenu i zatvorenu kolonu zaštitnih cijevi različitih promjera, koje su ugrađene do različitih stvarnih vertikalnih dubina.

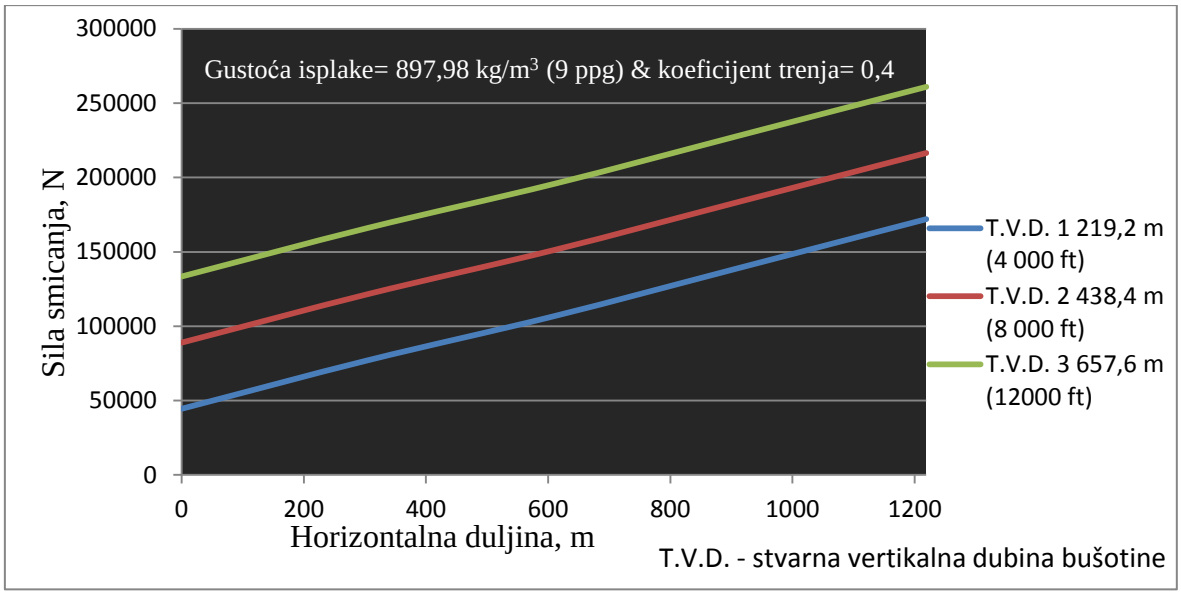
El-Sayed i dr. (1991.) su napravili proračune za tri promjera zaštitnih cijevi: (0,127 m (5"), 263 N/m (18 lb/ft); 0,1778 m (7"), 379 N/m (26 lb/ft); i 0,2445 m (9 5/8"), 686 N/m (47 lb/ft)) koje su ugrađene u horizontalnu bušotinu s duljinama horizontalne sekcije u rasponu od 0 do 914,4 m (3 000 ft). Pretpostavili su da je stvarna vertikalna dubina horizontalne (TVD) bušotine 1 828,8 m (6 000 ft). Također je pretpostavljeno da je cijev na dnu otvorena i da je koeficijent trenja 0,4. Rezultati su prikazani slici 5-5. Ova slika prikazuje opterećenje u točci C (slika 5-1) potrebno za potiskivanje zaštitnih cijevi kroz horizontalnu sekciju odnosno za svladavanje sile smicanja (*engl. drag force*). Proračun je proveden za horizontalni dio kanala, kut otklona je 90° pa je cosθ jednak nuli. Zbog toga se u proračunu koristi samo drugi dio jednadžbe 5-2 i sila izračuna kao umnožak koeficijenta trenja ($\mu = 0{,}4$) i sile F_n koja je jednaka težini zaštitnih cijevi koja se povećava s duljinom horizontalnog kanala i promjerom zaštitnih cijevi.

Općenito se može zaključiti da opterećenje potrebno za ugradnju zaštitnih cijevi odnosno za svladavanje sile smicanja raste s povećanjem: duljine horizontalnog dijela kanala bušotine, promjera zaštitnih cijevi i stvarne vertikalne dubine bušotine (El-Sayed et al., 1991).

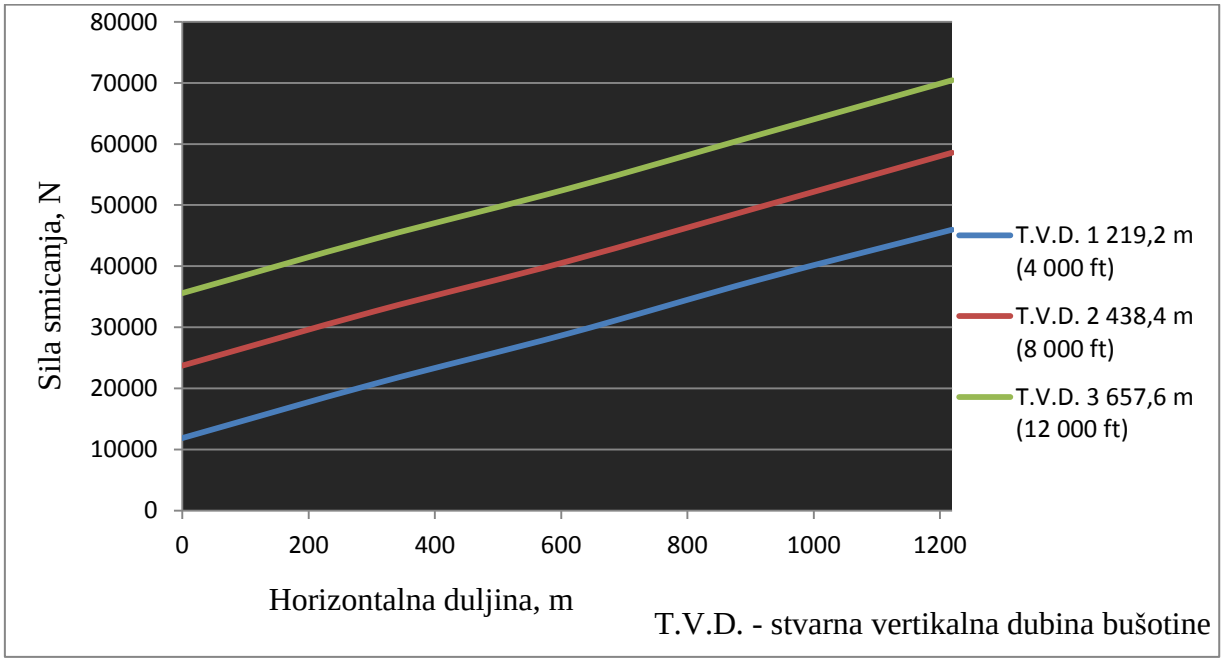


Slika 5-5. Oterećenje potrebno za potiskivanje zaštitnih cijevi kroz horizontalnu sekciju (El-Sayed et al., 1991)

Proračuni su napravljeni za zaštitnu cijev promjera 0,127 m (5") i nominalne težine 263 N/m (18 lb/ft). Rezultati su prikazani na slikama 5-6 i 5-7 koji prikazuju primijenjeno opterećenje u točci C sa slike 5-1 koje je potrebno za potiskivanje zaštitne cijevi kroz horizontalnu sekciju za zaštitnih cijevi s otvorenim i zatvorenim krajem. Ovo opterećenje raste s porastom horizontalnog pomaka (*engl. horizontal displacement*) dna bušotine kao i stvarne vertikalne dubine bušotine i jednako je sumi uzgona i sile natega. Sila natega je ista za zaštitne cijevi, otvorenog i zatvorenog kraja dok je sila uzgona (*engl. buyoncy*) za kolonu zaštitnih cijevi sa zatvorenim krajem 4 puta veća od one za kolonu zaštitnih cijevi sa otvorenim krajem. Na primjer, primijenjeno opterećenje na dubini 914,4 m (3 000 ft), u bušotini kod koje se horizontalna dionica nalazi na 1 828,8 m (6 000 ft) stvarne vertikalne dubine, iznosi oko 96 081,6 N (21 600 lb). Uzimajući u obzir utjecaj uzgona opterećenje tijekom ugradnje zaštitnih zatvorenog kraja će biti 43 592,6 N (9 800 lb), a i 161 915,3 N (36 400 lb) tijekom ugradnje kolone zaštitnih cijevi sa otvorenim krajem. Ovo opterećenje može oštetiti zaštitne cijevi tijekom spuštanja te je preporučeno uzeti ga u obzir prilikom dizajniranja kolone zaštitnih cijevi. Ovo opterećenje djeluje kao tlačno opterećenje u slučaju spuštanja kolone zaštitnih cijevi, a kao vlačno opterećenje prilikom izvlačenja kolone zaštitnih cijevi.



Slika 5-6. Opterećenje koje je potrebno za potiskivanje kolone zaštitnih cijevi s otvorenim krajem kroz horizontalnu sekciju kanala bušotine (El-Sayed et al., 1991)



Slika 5-7. Opterećenje koje je potrebno za potiskivanje kolone zaštitnih cijevi zatvorenog kraja kroz horizontalnu sekciju kanala bušotine (El-Sayed et al., 1991)

Drugi važni faktor u razmatranju djelovanja opterećenja na kolonu zaštitnih cijevi je slijeganje formacije koje rezultira neujednačenim opterećenjem (osobito u slučaju loše obavljene cementacije) na kolonu zaštitnih cijevi, a jednako je geostatičkom tlaku (tlakom

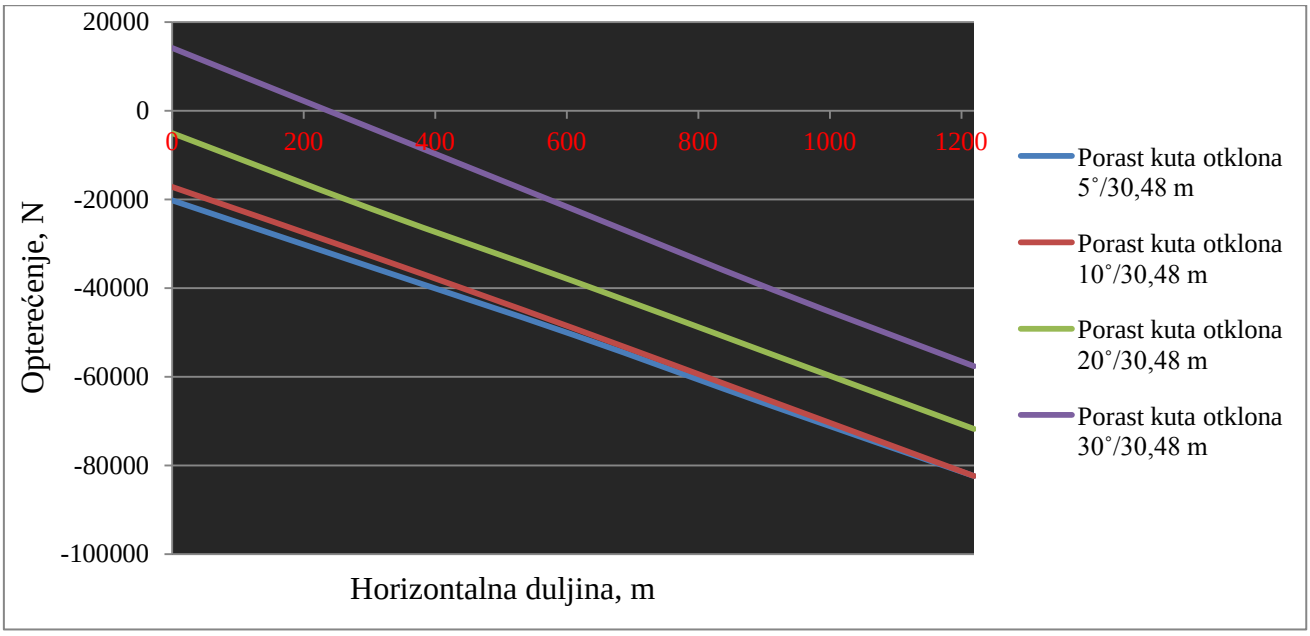
pokrovnih stijena),. Dokazano je da se otpornost zaštitnih cijevi na gnječenje (*engl. collapse resistance*) pod takvim opterećenjem smanjuje za 25% u odnosu na njenu početnu otpornost na gnječenje. Prema tim rezultatima kolona zaštitnih cijevi može biti nakon spuštanja ozbiljno oštećena zbog gnječenja ukoliko se ovo opterećenje ne uzme u obzir tijekom dizajniranja. Da bi izbjegli takav neuspjeh, preporuča se korištenje faktora sigurnosti na gnječenje kolone, zvani faktor sigurnosni zbog slijeganja formacije, s vrijednošću 2,0.

Treći faktor je utjecaj perforacija na otpornost zaštitnih cijevi koji ovisi o broju perforacije po 1 m duljine. Pokazano je da broj perforacija veći od 12 perforacije po 1 m (4 perf/ft) smanjuje otpornost zaštitnih cijevi na gnječenje za 10 do 60% od njene početne otpornosti. Otpornost na gnječenje (*engl. crushing resistance*) ima direktnu vezu s otpornošću na gnječenje, a njeno smanjenje može uzrokovati gnječenje cijevi. Ovisno o broju (gustoći) perforacija, pretpostavlja se faktor perforacije da korigira otpornost cijevi na gnječenje. Ovaj faktor se može izračunati kao recipročna vrijednost otpornosti cijevi na gnječenje i mora se pomnožiti s korigiranom vrijednošću gnječenja zbog djelovanja geostatičkog tlaka da bi se dobila konačna vrijednost sigurnosnog faktora (preporuča se sigurnosni faktor 1,25 koji predstavlja smanjenje od 20% zbog perforacija) (El-Sayed et al., 1991).

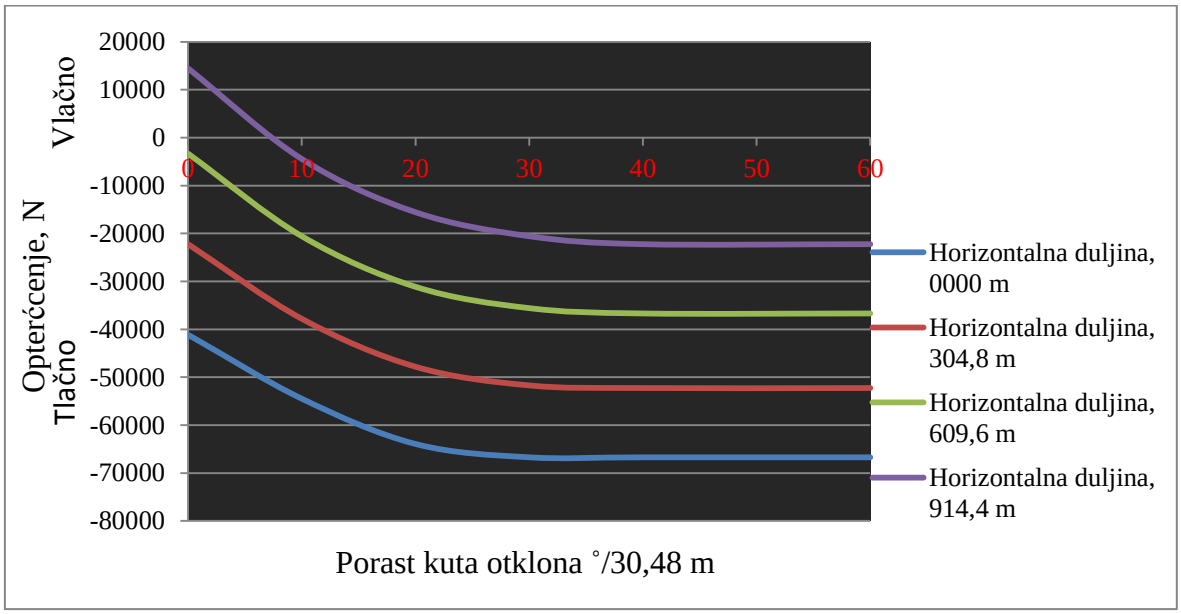
5.1.2. Naprezanja u otklonjenoj sekciji

Ova sekcija obično ima promjene u azimutu i u kutu otklona bušotine što izaziva savijanje i nateg kolone zaštitnih cijevi. Suprotno horizontalnoj sekciji, sila natega u ovoj sekciji nema linearnu vezu s mjerenom duljinom. Uzimajući u obzir da je promjena azimuta vrlo mala, i da se može zanemariti, napravljen je postepeni proračun za ovu sekciju da bi odredili nastalo opterećenje u točci skretanja kanala bušotine, točka B na slici 5-1. Proračuni su napravljeni za različite poraste kuta otklona od 5˚ do 50˚ no 30,48 m (100 ft). Na slici 5-8 prikazano je opterećenje tijekom ugradnje zaštitnih cijevi kao funkcija horizontalnog pomaka dna bušotine za različite kutove otklona. U slučaju spuštanja kolone zaštitnih cijevi, ovo opterećenje je većinom tlačno, i povećava se linearno s povećanjem duljine horizontalne sekcije. Slika 5-9 prikazuje ovo opterećenje kao funkciju porasta kuta otklona. Pokazuje da opterećenje raste nelinearnom brzinom do vrijednosti porasta kuta otklona od 25˚/30,48 m (100 ft). Za vrijednosti od 25˚ do 45˚/30,48 m (100 ft) opterećenje

je konstantno, a iznad 45˚/30,48 m počinje se opet smanjivati. Ovaj fenomen se uglavnom događa zbog smanjene mjerene duljine bušotine, kroz sekciju porasta kuta otklona, povećanjem porasta kuta otklona i uslijed smanjenja komponente opterećenja koja utječe na silu natega (El-Sayed et al., 1991).



Slika 5-8. Povećanje opterećenja zaštitnih cijevi tijekom ugradnje za različite kutove otklona (El-Sayed et al., 1991)



Slika 5-9. Opterećenje kao funkcija porasta kuta otklona (El-Sayed et al., 1991)

U slučaju izvlačenja kolone zaštitnih cijevi, sila natega će rezultirati u vlačnom opterećenju u točci B (slika 5-1). Za prethodni primjer, opterećenje u točci B (slika 5-1) tijekom spuštanja kolone zaštitnih cijevi promjera 0,127 m (5") i jedinične težine 263 N/m (18 lb/ft) u horizontalnu sekciju duljine 914,4 m (3 000 ft) i pri porastu kuta otklona od 20˚/30,48 m (100 ft) iznosi 55 157,9 N (12 400 lb), tlačnog opterećenja, dok opterećenje tijekom izvlačenja za istu točku iznosi 141 453,4 N (31 800 lb), vlačnog opterećenja. To znači da tijekom naizmjeničnog kretanja kolone gore-dolje točka B (slika 5-1) će biti podložna promjenama u opterećenju između – 55 157,9 N (12 400 lb) i + 141 453,4 N (31 800 lb) (El-Sayed et al., 1991). Drugo glavno opterećenje u otklonjenoj sekciji je opterećenje uslijed savijanja. To opterećenje može se izračunati sljedećom jednadžbom (Krištafor, 2009)

$$F_{as} = \left(\Delta\sigma_a\right)_{\max} \cdot A = E \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{\alpha}{l} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot A \qquad (5\text{-}4)$$

Gdje su:

F_{as} - ekvivalentna uzdužna sila zbog savijanja, N

D - nominalni promjer zaštitnih cijevi, m

l - duljina luka kružnice (funkcija intenziteta promjene kuta otklona, α), m

A-površina poprečnog presjeka cijevi, m^2

Π- ludolfov broj, 3,14

E- youngov modul elastičnosti, Pa

Ovo opterećenje raste linearno s porastom kuta otklona i rezultira u tlačnom opterećenju na konveksnoj strani cijevi i u vlačnom opterećenju na konkavnoj strani cijevi. Za razmatrani primjer ovo opterećenje iznosi $\pm$ 504 428,3 N (113 400 lb). Dodajući ovu vrijednost na opterećenje tijekom izvlačenja ili spuštanja u točci B (slika 5-1), kolona zaštitnih cijevi će biti podvrgnuta tlačnom opterećenju u iznosu od 559 586,3 N (125 800 lb) i vlačnom opterećenju u iznosu od 645 881,8 N (145 200 lb) koji bi mogli uzrokovati lom spojnice kolone zaštitnih cijevi (El-Sayed et al., 1991).

5.1.3. Naprezanja u vertikalnoj sekciji

U vertikalnoj sekciji kanala bušotine, opterećenje je maksimalno u točci A (slika 5-1). Ovo opterećenje je suma težine kolone zaštitnih cijevi od površine do točke skretanja kanala bušotine i opterećenja u točci B sa (slika 5-1). Za razmatrani primjer, točka

skretanja kanala bušotine nalazi se na 1 741,9 m (5 715 ft) stvarne vertikalne dubine bušotine. Na kraju ove sekcije težine kolone zaštitnih cijevi iznosi 457 588,5 N (102 870 lb), a vlačno opterećenje iznosi 141 453,4 N (31 800 lb) (točka B na slici 5-1). To znači da će na ušću bušotine (početku vertikalne sekcije) u točci A (slika 5-1), kolona zaštitnih cijevi biti opterećena sa 599 042 N (134 670 lb) tijekom izvlačenja, u usporedbi sa 645 881,8 N (145 300 lb) na kraju vertikalne sekcije za točku B. Jasno je, dakle da je maksimalno opterećenje kolone zaštitnih cijevi u točci B i to zbog natega i savijanja tijekom izvlačenja kolone. U međuvremenu horizontalna sekcija će biti podložna neujednačenom opterećenju koje smanjuje otpornost na gnječenje za 25% od njene početne vrijednosti (El-Sayed et al., 1991).

6. PRIMJERI IZRADE HORIZONTALNIH BUSOTINA VELIKOG DOSEGA

U nastavku će biti opisana tri primjera izrade horizontalnih bušotina velikog dosega. Opisan je način na koji su bušotine izrađene te oprema koja je korištena za izradu tih bušotina.

6.1. Izrada horizontalne bušotine velikog dosega u – Kataru

Kompanija Maersk Oil Qatar je počela s razradom odobalnog polja Al Shaheen u Katru 1994. godine, s primjenom tehnike izrade horizontalne bušotine koju je razvila kompanija Maersk Oil Qatar & Gas AL u Sjevernom moru, te je iste godine izbušila horizontalnu sekciju duljine 3 115,06 m (10 220 ft). Kompanija Maersk Oil Qatar upravlja poljem Al Shaheen, blok 5 pod zajedničkim ugovorom o proizvodnji s kompanijom Qatar Petroleum (QP) u ime države Katar. Polje zahvaća područje od 3 500 četvornih kilometara odobalnog područja Katar i nalazi se oko 80 kilometara sjeveroistočno od poluotoka Katar, (slika 6-1). Pravo na istraživanje i eksploataciju obuhvaća sve geološke formacije bloka 5 iznad Khuff formacije (Sonowal et al., 2009).



Slika 6-1. Blok 5 na Al Shaheen polju (Sonowal et al., 2009)

Glavni ciljevi bušenja obuhvaćaju (odozdo prema gore) karbonatne stijene formacije Kharaib B i Shuaiba i pješčenjake Nahr Umr (tablica 6-1). Formacija Kharaib je lateralno homogeni ujednačeni karbonat. Debljina Kharaib formacije je uglavnom 24,4 m (80 ft) s potencijalnim ležištem debljine 7,62 m (25 ft). Shuaiba formaciju karakteriziraju lateralne izmjene facijesa i različite propusnosti. Njena debljina je uglavnom 60,96 m (200 ft) s

potencijalnim ležištem debljine 6,096 m (20 ft). Nahr Umr formacija je pješčenjak debljine 6,096 m (20 ft) s potencijalnim ležištem debljine oko 1,524 m (5 ft) (Sonowal et al., 2009).

Tablica 6-1. Stvarni podaci pojedinih ležišta sa polja AL Shaheen (Sonowal et al., 2009).

Starost ležišta Miljune godina	Dubina m, (ft)	Naziv formacije (ležišta)	Debljina m, (ft)	Tip ležišne stijene
90	792,48 (2 600)	Khatiyah	12,192 (40)	-
97	822,96 (2 700)	Mauddud	10,668 (35)	-
100	914,4 (3 000)	Nahr Umr	4,572 (15)	Pješčenjak
110	944,88 (3 100)	Shuaiba	30,48 (100)	Karbonat
130	1097,28 (3 600)	Kharaib B	24,384 (80)	Karbonat
135	1127,76 (3 700)	Kharaib C	15,24 (50)	Karbonat

Odluka o bušenju horizontalnih bušotina velikog dosega je primarno pokrenuta zbog (Sonowal et al., 2009):

1. postojanja velikih akumulacija ugljikovodika,
2. loše proizvodnosti vertikalnih bušotina, i
3. velikog broja platformi koje bi bile potrebne da bi se ležište razradilo konvencionalnim vertikalnim ili zakrivljenim bušotinama (Sonowal et al., 2009).

Duljina ovih horizontalnih bušotina je produljena tijekom procesa razvoja, a neke od izrađenih bušotina prešle su granicu onoga što se moglo postići tadašnjom tehnologijom kao što je prikazano u tablici 6-2 (Sonowal et al., 2009).

Tablica 6-2. Horizontalne duljine bušotina velikog dosega (Sonowal et al., 2009)

Godina	Naziv bušotina	Horizontalna duljina, m (ft)
Svibanj 2008.	BD-04A	10 902,7 (35 770)
Svibanj 2004.	EA-04	8 148,83 (26 735)
Listopad 2002.	EA-26	7 755,94 (25 446)
Lipanj 2002.	EA-21	7 395,97 (24 265)
Lipanj 2002.	CA-17	6 682,43 (21 924)
Ožujak 2002.	CA-16	6 592,82 (21 630)
Svibanj 2001.	CA-04	6 579,11 (21 585)
Siječanj 2001.	CA-07	6 521,2 (21 395)
Travanj 1999.	CA-14	6 377,94 (20 925)
Studeni 1997.	BA-26	6 000,29 (19 686)
Srpanj 1997.	CA-30	5 346,19 (17 540)
Listopad 1995.	ALS-8	5 004,82 (16 420)
Kolovoz 1995.	ALS-5	3 982,21 (13 065)
Srpanj 1994.	ALS-2	3 886,2 (12 750)
Svibanj 1994.	ALS-3	3 115,05 (10 220)

Kad je bušotina ALS-3 izbušena na polju Al Shaheen 1994. godine do 4 895,4 m (16 061 ft) ukupne duljine kanala bušotine. U to vrijeme to je bila rekordna bušotina s horizontalnom duljinom od 3 115,06 m (10 220 ft). Kako rotirajući upravljivi sustavi nisu još bili dostupni, to je postignuto s konvencionalnom opremom za koso usmjereno bušenje kao što su uronjeni motor (dubinski isplačni motor) i stabilizatori za održavanje promjera kanala (*engl. adjustable gauge stabilizers*). Razvoj opreme i procedura je nastavljen radi daljnje izrade horizontalnih bušotina velikog dosega na polju Al Shaheen. Kako su suvremeniji alati postajali sve dostupniji, njihova primjena je omogućila postizanje sve većeg horizontalnog dosega kanala bušotine (Sonowal et al., 2009).

Da bi dalje unaprijedili pridobivanje nafte iz ležišta sa Al Shaheen polja Maresk Oil Qatar je 2007. godine prihvatio nove izazove bušenjem sedam još duljih bušotina i kako bi povećao broj izbušenih horizontalnih bušotina velikog dosega. Kontinuirani napredak „pomicanja granica“ doveo je do izrade rekordne bušotine BD-04A (Sonowal et al., 2009). Kompanija Maersk Oil Qatar (AS MOQ) uspješno je završila u ožujku 2008. godine bušenje bušotine velikog dosega BD-04A izrađene na moru (*engl. offshore*) u Katru s

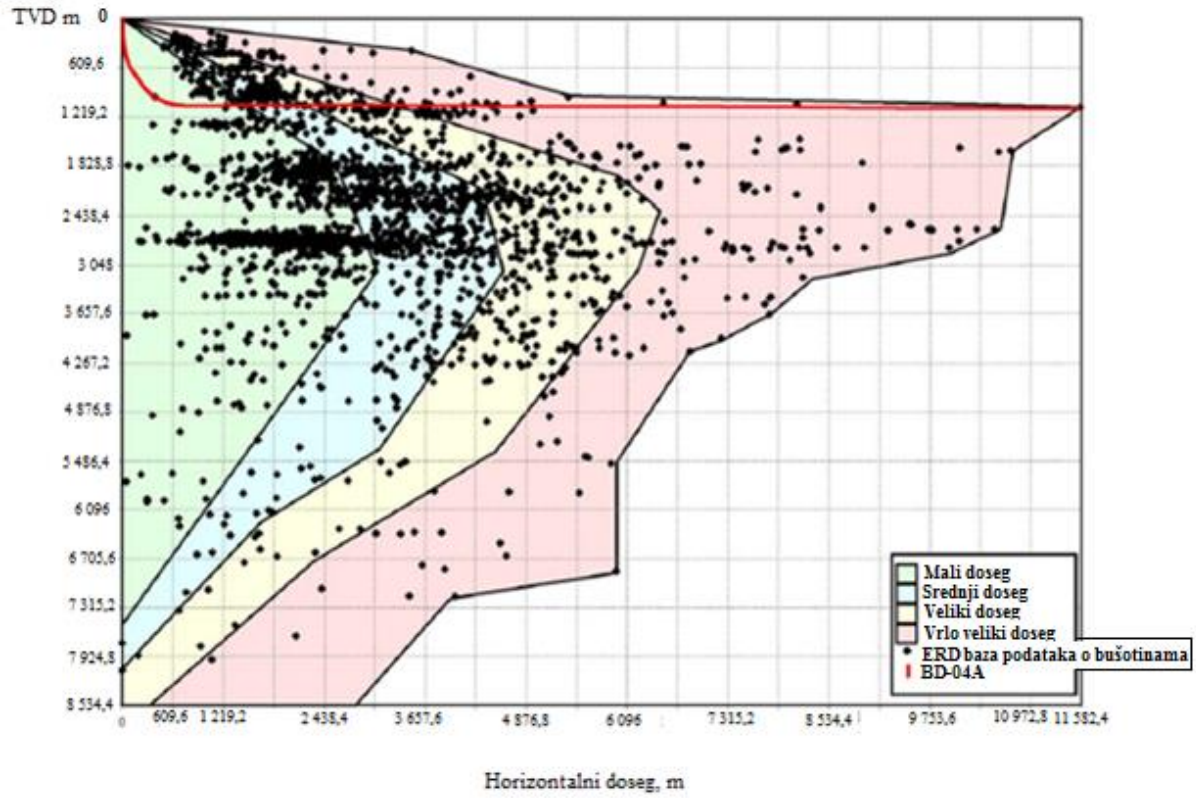
rekordnom horizontalnom duljinom od 10 902,7 m (35 770 ft). Izradom ove bušotine u tom trenutku je bio postavljen novi svjetski rekord jer je bila najdulja bušotina s 12 289,54 m (40 320 ft) mjerene duljine od vrtaćeg stola (MDRT- *engl. measured depth, rotary table*) (Sonowal et al., 2009).

6.1.1. Izrada bušotine BD-04A

Cilj izrade bušotine BD-04A bio je crpiti ugljikovodike iz ležišta koja zaliježu južno od ležišta koja se crpe bušotinom Kharaib BA-33. Kanal bušotine BD-04A izrađen je bitno dulji od planiranog. Planirana konačna duljina bušotine iznosila je 8 793,48 m (28 850 ft). Međutim kanal bušotine je izrađen do 12 289,54 m (40 320 ft) radi bolje procjene lokacije nove bušotine u istočnom bloku i povećanja raskrivenosti ležišta. U skladu s revidiranim rudarskim projektom bušotina je izvedena kontroliranom promjenom azimuta od 35˚ (Sonowal et al., 2009).

Bušotina BD-04A je 2008. godine postavila dva velika rekorda u naftnoj industriji, a to su:

1. Sa 12 289,54 m (40 320 ft) mjerene duljine od vrtaćeg stola, BD-04A je najdulja ikad izbušena bušotina, dosegnuta je i najveća udaljenost od ušća bušotine u vrijednosti od 11 045,3 m (36 238 ft) prikazano na slici 6-2 (Sonowal et al., 2009).
2. Najdulja horizontalna sekcija sa 10 902,7 m (35 770 ft) (npr. od prvog snimanja iznad 86˚ inklinacije na 1 386,84 m (4 550 ft) MDRT do konačne dubine (TD) na 12 289,5 m (40 320 ft)) (Sonowal et al., 2009).



Slika 6-2. Usporedba bušotine BD-04A s ostalim bušotinama velikog dosega (Sonowal et al., 2009)

Osim postavljanja rekordne duljine BD-04A je postigla nekoliko prekretnica (Sonowal et al., 2009):

1. najdulja sekcija kanala promjera 0,2159 m (8 ½ in.) s 10 804,86 m (35 449 ft);
2. najveća izbušena duljina kanala uz korištenje rotirajućeg upravljivog dubinskog bušaćeg sklopa te alatki za karotažna mjerenja;
3. najveći doseg naspram stvarne vertikalne dubine (bušotina velikog dosega), u omjeru od 10,48;
4. najduža obrada stijena kiselinom (korišteno 2 799,77 m^3 (17 610 bbls) kiseline).
5. Najveći indeks koji pokazuje složenosti izrade horizontalnog kanala bušotine (*engl. directional difficulty indeks*) u iznosu od 8,279 (Sonowal et al., 2009).

Bušotina BD-04A je izbušena uz primjenu postrojenja relativno malog kapaciteta. Postrojenje sadrži dvije pumpe 2x1 193,12 kW (2x1 600 ks) s efektivnim tlakom na površini od 27 579,03 do 28 957,98 kPa (4 000 - 4 200 psi) i vrtaćim stolom TDS-4H koji

može ostvariti torziju u iznosu od 54 232,718 Nm (40 kft-lb) pri 120 okretaja u minuti (*engl. rpm*). Kapacitet bušaćeg tornja je ograničen tako da se u njega može odložiti (otprilike 5 181,6 m (17 000 ft)) ili 181 pas bušaćih šipki promjera 0,127 m (5") (Sonowal et al., 2009).

6.1.2. Izrada gornjeg dijela kanala bušotine promjera 0,4064 m (16 in.) i 0,31115 m (12 ¼ in.)

Bušotina BD-04A, s planiranom promjenom smjera kanala bušotine od maksimalnih 3 stupnja/30,48 m (100 ft) na vrhu sekcije promjera 0,4064 m(16") i 0,3111 m (12 ¼ in.) je izbušena korištenjem rotirajućeg upravljivog sustava koji „gura“ (*engl. push-the-bit rotary steerable assemblies*) dlijeto te je horizontalni dio postavljen tako da ulazi u ležište Kharaib pod kutom otklona 89,8˚ na 1487,7 m (4 881 ft) mjerene duljine od vrtaćeg stola (MDRT- *engl. measured depth, rotary table*) odnosno na 1 061,3 m (3 482 ft) stvarne vertikalne dubine od vrtaćeg stola (TVDRT- *engl true vertical depth, rotary table*). Peta kolone zaštitnih cijevi promjera 0,2445 m (9 5/8 in.) je postavljena na dubini od 1 484,7 m (4 871 ft). Prednosti upotrebe rotirajući upravljivih sustava u navedenim sekcijama je, manja zavojitost, dobro čišćenje kanala bušotine i lakša ugradnja kolone zaštitnih cijevi (Sonowal et al., 2009).

6.1.3. Izrada dijela kanala bušotine promjera 0,2159 m (8 ½ in.) kroz ležište

Isplaka korištena za ispiranje tijekom izrade kanala bušotine promjera 0,2159 m (8 ½ in.) bila je nedispergirana isplaka s niskim sadržajem čvrstih čestica na bazi vode gustoće 927,92 do 957,85 kg/m^3 (9,3-9,6 ppg) s natrijevim kloridom (NaCl) ili kalcijevim karbonatom ($CaCO_3$). Reološka svojstva isplake održavana su dodavanjem ksantan smole (trgovački naziv Duotec) da bi se osigurala plastična viskoznost (uključujući i viskoznost pri maloj brzini smicanja- LSRV (*engl. Low Shear Rate Viscosity*)) koja će omogućiti dobro čišćenje kanala bušotine. Statička i dinamička filtracija je na početku kontrolirana dodavanjem aditiva za smanjene filtracije i zadržavanje oteživača u suspenziji (poluanionske celuloze PAC-Ul i Polysal) a kasnije je održavana dodavanjem Polysala tijekom bušenja same sekcije. U ovoj je sekciji učinkovito bilo i povremeno korištenje jako

viskoznih čistača (*engl. sweeps*) radi boljeg čišćenje kanala bušotine (Sonowal et al., 2009).

Isplaka s niskim sadržajem čvrstih čestica ima dvije važne karakteristike koje su kritične za uspješnu izradu bušotine (Sonowal et al., 2009):

1. čišćenje kanala bušotine je postignuto relativno jednostavno,
2. proširenje kanala bušotine s vremenom (kod izrade bušotine BD-04A, kao i kod susjednih bušotina, došlo je do proširenja kanala bušotine do prosječne veličine promjera od 0,2413 do 0,254 m (9 ½ in.-10 in.)).

Nakon početnih problema održavanja traženog azimuta tijekom bušenja izvan pete kolone zaštitnih cijevi promjera 0,2445 m (9 5/8 in.) na dubini od 1 484,7 m (4871 ft) do 1 643,5 m (5 392 ft) mjerene duljine od vrtaćeg stola, bilo je neophodno izraditi neposredno ispod pete kolone zaštitnih cijevi bočni kanal bušotine (*engl. sidetrack*). Skrenuti kanal bušotine je tada izbušen uz dva spuštanja dubinskog bušaćeg sklopa do rekordne konačne dubine bušotine BD-04A od 12 289,5 m (40 320 ft) (Sonowal et al., 2009).

Prvi dio horizontalne ležišne sekcije kanala promjera 0,2159 m (8 ½ in.) je izbušen do 7 202,4 m (23 630 ft) uz prosječnu brzinu bušenja (ROP) od 67,36 m/h (221 ft/h) i primjenu rotirajućeg upravljivog sustavom (BHA) koji „gura“ dlijeto (*engl. push the bit*) i dlijeta s insertima od volframa karbida (*engl. insert bit*). U ovom intervalu zabilježeni su gubici isplake u statičkim uvjetima na dnu bušotine u iznosu od 1,3 do 1,9 m^3/h (8-12 bbls/h). Primijenjeno je geološko-upravljanje (*engl. geo-steering*) pomoću karotažnih podataka dobivene tijekom bušenja (*engl. logging while drilling- LWD*) da bi održali bušotinu BD-04A unutar prihvatljive stvarne konačne dubine (TVD) i izradili kanal bušotine u samom ležištu. Tijekom bušenja faktor trenja uslijed torzije u početku je bio relativno velik kada se bušilo ispod pete kolone zaštitnih cijevi, međutim, faktor trenja kasnije se stabilizirao i imao je vrijednost od 0,2 do 0,25. U slučaju da je faktor trenja uslijed torzije ostao 0,25, konačna dubina (TD) bi bila ograničena torzijom do 8 229,6 m (27 000 ft) sa bušaćim šipkama promjera 0,127 m (5") i API spojnicama. Nakon dubine od 7 620 m (25 000 ft) u isplaku je dodavan podmazivač na početku u koncentraciji od 2%. Nakon dodavanja podmazivača u isplaku faktor trenja uslijed torzije se smanjio i iznosio je od 0,19 do 0,21 (Sonowal et al., 2009).

Na dubini od 7 202,4 m (23 630 ft) (nakon bušenja 5 748,22 m (18 859 ft) kanala bušotine promjera 0,2159 m (8 ½ in.)) komunikacija s rotirajućom upravljivom alatkom je izgubljena, a dubinski bušaći sklop (BHA) je izvučen iz kanala bušotine (Sonowal et al., 2009).

U tom trenutku, odlučeno je povećati konačnu duljinu (TD) u odnosu na prethodno planiranu od 8 793,48 m (28 850 ft). Modeliranje torzije i natega je pokazalo da će očekivano torzijsko opterećenje u slučaju povećanja konačnu dubinu (TD) premašiti sposobnost bušaćih šipki i vršnog pogona (*engl. top drive*), ekvivalentna cirkulacijska gustoća isplake (ECD) također će biti neprihvatljivo visoke vrijednosti ako se nastavi s bušenjem koristeći kolonu bušaćih šipki promjera 0,127 m (5") čak i s povećanjem promjera kanala bušotine (*engl. hole enlargement*) do 0,2413 m (9 ½ in.). Daljnje modeliranje ekvivalentnu cirkulacijsku gustoću isplake je pokazalo da bi kombinirana kolona bušaćih šipki koja u svom sastavu sadrži bušaće šipke promjera 0,1016x0,127 m (4"x5") bila prihvatljiva za izradu horizontalnog dijela kanala bušotine s obzirom na torziju i ekvivalentnu cirkulacijsku gustoću isplake (ECD). Korištenje kombinirane kolone bušaćih šipki promjera 0,1016x0,127 m (4"x5"), ipak, bi pomoglo rezultirati većim tlakom pumpe i smanjenim protokom na konačnoj dubini (TD) bušotine BD-04A. Duljina bušaćih šipki promjera 0,1016m (4 in.) je bila kritična za podjednako zadovoljenje ovih kontradiktornih potreba. Zbog toga su napravljene daljnje procjene torzije i natega, kao i ekvivalentne cirkulacijske gustoće isplake te hidrauličkih modela, pri čemu je postignuta ravnoteža u dizajniranju kombinirane kolone bušaćih šipki s otprilike 2 133,6 m (7 000 ft) bušaćih šipki promjera 0,1016 m (4"). U sklopu napora za smanjenje torzije, također je uključeno u gornjem dijelu kolone bušaćih šipki 4 572 m (15 000 ft) bušaćih šipki promjera 0,127 m (5") i jedinične težine 26,44 N/m (19,5 ppf) sa spojnicama koji podnose visoka torzijska naprezanja (Sonowal et al., 2009).

Odabran je rotirajući upravljivi sustav koji upravlja dlijetom pomoću zglobne osovine (*engl. „point the bit“*) jer zahtjeva puno manji pad tlaka preko alata za rad u usporedbi sa sustavom koji „gura“ dlijeto (*engl. „push the bit“*). Za dlijeto su također odabrane veće mlaznice, otuda i daljnje poboljšanje tlaka pumpe i protoka na konačnoj dubini (*engl. Total depth-TD*) (Sonowal et al., 2009).

Još jedan ključni detalj za povećanje učinka rotirajućeg upravljivog dubinskog bušaćeg sklopa je smanjenje udaraca i vibracija na dnu bušotine čime se smanjuju

negativni efekti na dugotrajni rad rotirajućeg upravljivog sustava i povećava ukupna brzina bušenja. Kako bi smanjili vibracije (lijepljenje kod klizanja (*engl. „stick slip“*)), uvrtanje dubinskog bušaćeg sklopa, torzija itd.), na početku se pokušalo smanjiti iste podešavanjem parametara bušenja i dodavanjem podmazivača u isplaku. Sustav mjerenja tijekom bušenje omogućio je dobivanje opsežnih podataka u stvarnom vremenu te kasniju analizu ponašanja niza bušaćih alatki. Ovaj proces je omogućio razvoj dobre bušaće prakse, primjenom koje se mogu smanjiti udarci i vibracije, i na kraju omogućio razvoj korelacije između podataka na površini i na dnu o opterećenju na dlijeto i torziji, za upotrebu u izradi novih bušotina velikog dosega (Sonowal et al., 2009).

Kombinirana kolona bušaćih šipki promjera 0,1016 m i 0,127 m (4" i 5") sa rotirajućim upravljivim (BHA) sustavom koji upravlja dlijetom preko zglobne osovine (*engl. „point the bit“*) je djelomično izvučena iz kanala bušotine (u tom trenutku dlijeto se nalazilo na 6 820,21 m (22 376 ft) mjerene duljine). Zatim je kanal bušotine proširen/očišćen do dna. Bušenje je nastavljeno od 7 202,4 m (23 630 ft) do 10 325,71 m (33 877 ft) s prosječnom brzinom bušenja od 36,6 m/h (120 ft/hr). Moment torzije je praćen u slučaju kad se faktor trenja kretao između od 0,18-0,21, što je trebalo biti unutar granica vršnog pogona tijekom napredovanja prema konačnoj dubini (TD). Gubici isplake su povećani na 3,97 do 5,40 m^3/h (25-34 bbls/hr) od dubine 8 107,68 m (26 600 ft). Na dubini od 10 325,71 m (33 877 ft) do 5 579,97 (18 307 ft) m izvedeno je pročišćavanje kanala (*engl. wiper trip*) radi ponovnog postavljanja bušaće šipke visoke otpornosti na torziju u poziciju. Niz bušaćih alatki je zatim spušten do 8 103,11 m (26 585 ft) i bušotina je očišćena do dna. Mogućnost spuštanja alatki do 8 103,11 m (26 585 ft) bez nasjedanja pokazalo je da je stanje kanala bušotine bilo dobro (Sonowal et al., 2009).

Koncentracija podmazivača u isplaci je povećana s 2% na 3% na dubini od 8 534,4 m (28 000 ft). Povećanje koncentracije podmazivača u isplaci bilo je potrebno ne samo zbog torzije nego da se smanji i lijepljivost obloga u svrhu povećanja brzine bušenja i očuvanja dubinskih alatki. Faktor trenje uslijed torzije se smanjio s povećanjem koncentracije podmazivača (Sonowal et al., 2009).

Na dubini od 10 210,8 m (33 500 ft) izvršeno je skretanje putanje kanala bušotine prema azimutu od 35˚ udesno do dubine od 10 972,8 m (36 000 ft) za poravnanje putanje bušotine s linijskim postavljenim budućim bušotinama za istiskivanje nafte zavodnjavanjem u slijedećoj fazi razrada ležišta. Tijekom bušenja na dubini od 11 164,82

m (36 630 ft) postignuta je maksimalna torzija u iznosu od 48 809,45 do 52 876,9 Nm (36 do 39 kft-lbs) (prethodni prosjek bio je od 43 386,17 do 44 741,99 Nm (32 do 33 kft-lbs)), što se podudarilo s većim gubitkom isplake na toj dubini. Maksimalna torzija je dostignuta vjerojatno zbog promjene azimuta. Za svaki slučaj izveden je manevar nizom bušaćih alatki (*engl. wiper trip*) do 10 210,8 m (33 500 ft) i bušotina je isprana do dna, a stijenke kanala su obrađene. Bušenje je nastavljeno s prosječnom brzinom bušenja od 36,6 do 41,2 m/h (od 120 do 135 ft/hr) uz torziju u iznosu od 43 386,17 do 47 453,63 Nm (32 do 35 kft-lbs) (faktor trenja nalazi se u rasponu od 0,18 do 0,21) do rekordne konačne duljine od 12 289,54 m (40 320 ft) (Sonowal et al., 2009).

Geološko pozicioniranje je kritično za bušenje i pozicioniranje kanala bušotine u ciljanu formaciju, jer je debljina ležišta približno 3 m (10 ft), a uz to je ležište ispresijecano rasjedima. Položaj putanje precizno je pozicioniran kroz cijelo ležište pomoću karotažnih podataka dobivenih tijekom bušenja (gama-ray, otpornost dlijeta, poroznost i ukupna gustoća) kao i različitih mjerenja tijekom bušenja (inklinacija, otklon itd.). Za donošenje pravovremene odluke o geološkom pozicioniranju korištene su informacije dobivene na konačnoj dubini od 12 289,54 m (40 320 ft) korištenjem standardne opreme, prenošeni su i bilježeni signali preko isplake (*engl. mud pulse signals*) dobiveni mjerenjem tijekom bušenja (MWD) i mjerenjem svojstava formacije tijekom bušenja (LWD). Brzina prijenosa podataka je smanjena sa 3 bit/s na 1,5 bit/s nakon dosezanja dubine od 10 668 m (35 000 ft) za poboljšanje kvalitete podataka (Sonowal et al., 2009).

6.1.4. Ključne promjene koje su omogućile izradu bušotine BD-04A

Bušenje bušotine BD-04A do 12 289,54 m (40 320 ft) nije moglo biti ostvareno prije inicijative kompanije Maersk Oil Qatar krajem 2007. godine da ponovno razmatra razloge za dosezanjem krajnjih granica na Al Shaheen polju. Cilj razmatranja je bio proširiti mogućnost primjene bušotina većih dosega za buduću razradnu fazu Al Shaheen polja. Već ranije je utvrđeno da su u to vrijeme doseg i brzina bušenja sekcije kanala bušotine promjera 0,2159 m (8 ½ in.) bili ograničeni sposobnošću spojnica bušaćih šipki da podnesu torziju i opterećenje uslijed ekvivalentne cirkulacijske gustoće isplake, a ne kapacitetom vršnog pogona i samog postrojenja. Kao rezultat toga, započelo se s nabavom bušaćih šipki promjera 0,127 m (5") sa spojnicama koji podnose veći zakretni moment, kao i uvođenje

sekcije bušaćih šipki promjera 0,1016 m (4"). Ova nadogradnja opreme pridonijela je uspjehu izrade bušotine BD-04A. Trenutno poboljšanje nakon odabira i primjene kombiniranog niza bušaćih šipki prikazana je u tablici 6-3 (Sonowal et al., 2009).

Tablica 6-3. Prednosti kombiniranog niza bušaćih šipki (Sonowal et al., 2009)

Kolona bušaćih alatki	Torzija tijekom bušenja (N m)	Faktor trenje	Ekvivalentna cirkulacijska gustoća isplake (kg/m^3)
Kolona bušaćih šipki promjera 0,127 m (5")	od25 760,5 do 35 251,3	od 0,20 do 0,24	1 821,36
Kombinirani niz bušaćih šipki promjera 0,127 m i 0,1016 m (5" i 4 ")	od 18 981,4 do 28 472,1	od 0,18 do 0,21	1 713,52

Kritične promjene koje su omogućile ovaj izvanredni doseg su (Sonowal et al., 2009):

- nadogradnja bušaćih šipki sa spojnicama koji podnose veći moment torzije vršnog pogona;.
- dizajn kombiniranog niza bušaćih šipki sa šipkama manjeg vanjskog promjera u donjem dijelu, omogućio smanjenje torzijskog naprezanja i ekvivalentne cirkulacijske gustoće isplake, te dodatno smanjenje faktora trenja;
- upotreba podmazivača u isplaci dovela je do smanjenja torzije i smanjenja lijepljenje niza alatki uz stijenku kanala bušotine;
- povećani fokus na podešavanje ekvivalentne cirkulacijske gustoće isplake; izrada prethodnih bušotina bila je ograničena torzijom;
- u fazi planiranja naglasak je stavljen na dizajniranje putanje kanala bušotine i izradu kanala, s ciljem smanjenja nepotrebne nagle promjene kuta otklona kanala bušotine (*engl. dog legs*) uz smanjenje torzije i natega.

Na temelju faktora trenja uslijed torzije, su tijekom izrade bušotine BD-04A, konačna dubina bi bila ograničena zbog torzije do duljine ± 9 144 m (30 000 ft) ili manje s osnovnom opremom koja se sastoji od bušaćih šipki promjera 0,127 m (5") sa API spojnicama, jer je ekvivalentna cirkulacijska gustoća isplake mogla biti veća rezultirajući s

nedopustivim gubitkom isplake. Poboljšanje opreme je izravno zaslužna za najmanje 3 048 m (10 000 ft) dodatnog dosega na bušotini BD-04A (Sonowal et al., 2009).

Bušotina BD-04A je završena na 12 289,54 m (40 320 ft) zbog logističkih razloga nakon obavljanja temeljite procjene rizika. Zabilježena torzijska naprezanja, su i dalje bila takvih vrijednosti da ih podnosi niza bušaćih šipki, vršni pogon i bušaće postrojenje. Simulacije su pokazale da bi u situaciji da je bušenje nastavljeno mogla biti postignuta konačna dubina do $\pm$ 13 411,2 m (44 000 ft) (ograničujući faktor predstavljao je vršni pogon), uz pretpostavku da je gubitak isplake zbog velike ekvivalentne cirkulacijske gustoće isplake i dalje unutar prihvatljivog raspona (Sonowal et al., 2009).

6.2. Izrada horizontalne bušotine velikog dosega na polju Sakhalin

Projekt Sakhalin 1 obuhvaća odobalna polja Chayvo, Odoptu i Arkutun Dagi, koja se nalaze uz istočnoj obali otoka Sakhalin, Rusija (slika 6-3). Istražni radovi započeli su 2003. godine na polju Chayvo s kopnenim bušaćim postrojenjem Yastreb i nastavljeni 2005. godine s razradnim bušenjem s platforme Orlan. U 2009. godini, postrojenje Yastreb je preseljeno na polje Odoptu, otprilike 75 km sjeverno od njegove prethodne lokacije na polju Chayvo. Na polju Odoptu, izbušeno je 9 horizontalnih bušotina velikog dosega u periodu od 2009. godine do 2011. godine s ciljem dosezanja miocenskih piješčenjaka (Walker, 2012). U siječnju 2011. godine, 15 od 20 najduljih bušotina velikog dosega na svijetu bilo je izbušeno u okviru projekta Sakhalin 1, s tim da je bušotina Odoptu OP-11 nadmašila bušotinu BD-04A koju je kompanija Maersk Oil Qatar izbušila 2008. godine u Katru (Sonowal et al., 2009). Zbog ograničenih podataka s istražnog bušenja na polju Odoptu, osmišljeno je da se razrada polja izvodi u fazama. Prva faza razrade polja osmišljena je kako bi se analizirali podaci dobiveni bušenjem i proizvodnjom što bi omogućilo optimiranje razrade polja u budućnosti. Dakle, projekt je uključio bušenje vertikalne bušotine za odlaganje otpadnih fluida i sedam bušotina velikog horizontalnog dosega, s dvije dodatne bušotine velikog dosega koji bi bile izbušene naknadno. Nakon bušenja vertikalne bušotine za odlaganje otpadnih fluida (isplaka i krhotine) prve dvije bušotine velikog dosega na polju Odoptu su dizajnirane da se utvrdi dubina kontakta plin/nafta ili nafta/voda, time se poboljša preostale ciljeve bušenja. Prvom bušotinom, (OP-8), kroz ležište je izbušena horizontalna sekcija promjera 0,2159 m (8 ½ in.) (pilot kanal) kroz ležište s naftom i usmjerena je uz nagib sloja kako bi se lociralo mjesto kontakta plin/nafta ili nafta/voda, izmjerio ležišni tlak. Nakon toga taj dio kanala bušotine (pilot kanal) je napušten, te je izbušena i opremljena horizontalna proizvodna bušotina. Druga bušotina, (OP-7) izbušena je kako bi se odredili gradijenti tlaka i fluida u akviferu ležišta. Zatim je skrenuta horizontalno kroz naftni stupac i puštena je u proizvodnju. Korištenjem podataka o tlaku i kontaktu nafta/voda iz te dvije bušotine je određena visina stupca nafte i određen je vertikalni položaj naknadnih bušotina u dijelovima ležišta (Walker, 2012).



Slika 6-3. Otok Sakhalin sa poljima Chayvo, Odoptu i Arkutun Dagi (Walker, 2012)

6.2.1. Dizajn bušotina na polju Odoptu

Na polju Odoptu (uključujući bušotinu OP-11), tipična konstrukcija bušotine uključuje zaštitne cijevi promjera 0,762 m (30 in.), 0,4731 m (18 5/8 in.) i 0,3461 m (13 5/8 in.), lajner promjera 0,2445 m (9 5/8 in.) i kanal bušotine promjera 0,2159 m (8 ½ in) ,i opremljena je s 0,1397 m (5 ½ in.) pješčanim zasipom (*engl. completion screens*), uređaje za kontrolu dotoka fluida u bušotinu, bubreće pakere i tubing promjera 0,1397 m (5 ½ in.) do površine. Konduktor kolona promjera 0,762 m (30 in.) ugrađena je do dubine cca. 90 m. Kanal bušotine promjera 0,6096 m (24 in.) izbušen je do 800 m uz primjenu isplake na bazi vode i otklon bušotine od 40˚ do 45˚. Kolona zaštitnih cijevi promjera 0,4731 m (18 5/8 in.) ugrađena je i cementirana do površine koristeći tehniku cementacije kroz kolonu bušaćih šipki. Zatim je izbušen kanal bušotine promjera 0,4445 m (17 ½ in.) do 3 800 m stvarne uspravne dubine ili do 5 250 m mjerene duljine kanala uz primjenu isplake koja nije na bazi vode, s porastom kuta otklona do 80˚ (ili do 87˚), nakon čega je kolona zaštitnih cijevi promjera 0,3461 m (13 5/8 in) ugrađena i cementirana. Bušenje je

nastavljeno dlijetom promjera 0,31115 m (12 ¼ in.), pri čemu je postignut kut otklona neposredno prije ulaska u ciljano područje zasićeno ugljikovodicima. To omogućava izradu horizontalnog kanala bušotine za proizvodnju kroz ciljane pijeske i smanjenje rizika uslijed pozicioniranja bušotine. Lajner promjera 0,2445 m (9 5/8 in.) spušten je na nizu bušaćih šipki promjera 0,1683 m (6 5/8 in.) koji je bio ispunjen isplakom da bi se postiglo dodatno opterećenje potrebno za potiskivanje kolone zaštitnih cijevi ili rotaciju. Nakon ugradnje, lajner je cementiran, a na vrhu lajnera postavljen je paker. Proizvodni kanal bušotine promjera 0,2159 m (8 ½ in.) izbušen je horizontalno kroz ciljane pijeske. Na konačnoj dubini bušotine isplaka je zamijenjena s filtriranom isplakom koja nije na bazi vode (NAF) da ne bi došlo do čepljenja otvora na zasipu (Walker, 2012). Završno opremanje donjeg dijela kanal bušotine je obavljeno pomoću isplačne glave koja omogućava bušaćim šipkama rotaciju da savladaju aksijalno trenje, a spriječava rotaciju filtara (*engl. screens*) u opremljenom donjem dijelu kanala bušotine. Nakon ugradnje lajnera i aktiviranje vješalice lajnera, opremljen je gornji dio kanala bušotine ugradnjom tubinga promjera 0,1397 m (5 ½ in.), dubinskog manometra, bočnog vretena za gas lift i dubinskog sigurnosnog ventila koji je kontroliran s površine (Walker, 2012).

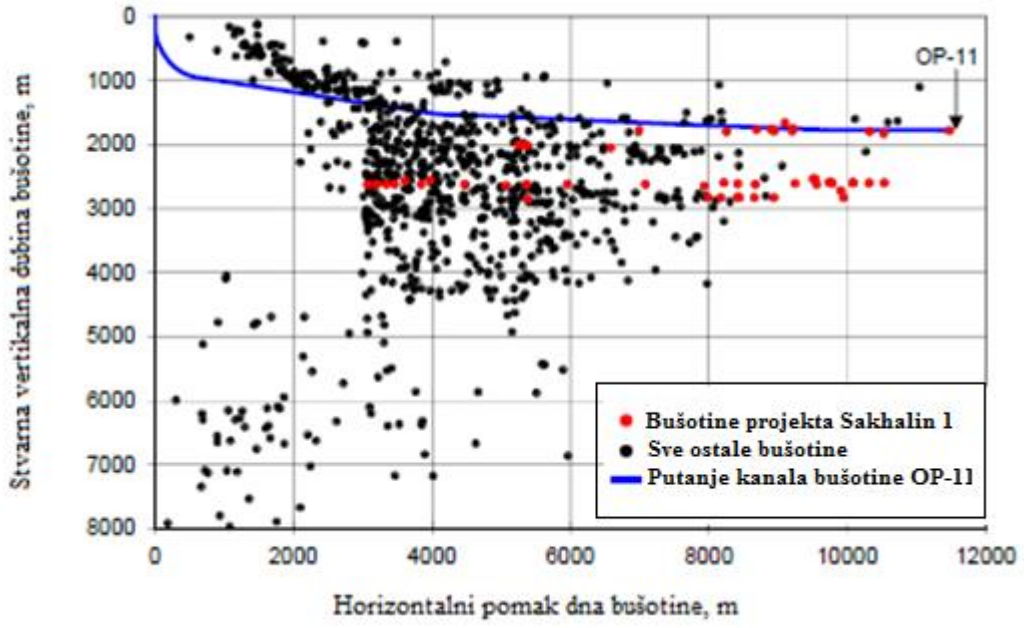
Bušaće postrojenje Yastreb ima vršni pogon koji može ostvariti okretni moment u iznosu od 123 379,43Nm (91,000 ft/lb) pri 130 okr/min, bušaće šipke promjera 0,1683 m (6 5/8 in.) i 0,1492 m (5 7/8 in.), četiri isplačne pumpe, šest vibracijska sita, i značajan prostor za skladištenje isplake i goriva (Walker, 2012).

Na temelju izrade prvih nekoliko bušotina na polju Odoptu došlo je do spoznaja koje su dovele do neznatnih modifikacija u dizajniranju novih bušotina. Upotrebom isplake veće gustoće u kanalu bušotine promjera 0,4445 m (17 ½ in.) eliminirana je nestabilnost stijenke kanala bušotine i omogućeno je glatko potiskivanje kolone zaštitnih cijevi promjera 0,3461 m (13 5/8 in.). U kanalu bušotine promjera 0,3111 m (12 ¼ in.) uočeno je također nestabilnost stjenki kanala bušotine, što je rezultiralo povećanjem gustoće isplake sve do 1 497,83 kg/m^3 (12,5 lb/gal). Kako bi se smanjili rizici povezani s nestabilnošću u kanalu bušotine promjera 0,3111 m (12 ¼ in.), dubina postavljanja zaštitne cijevi promjera 0,3461 m (13 5/8 in.) je produljena u odnosu na prvotno planiranu. Prema početnom dizajnu bušotine planirana je ugradnja kolone zaštitnih cijevi promjera 0,3461 m (13 5/8 in.) do 3 800 m mjerene duljine. Kolona zaštitnih cijevi promjera 0,3461 m (13 5/8 in.) na bušotini OP-11 ugrađena je najdublje na 5 254 m mjerene duljine (1 542 m stvarne vertikalne dubine bušotine). Ugradnja kolone zaštitnih cijevi promjera 0,3461 m (13 5/8

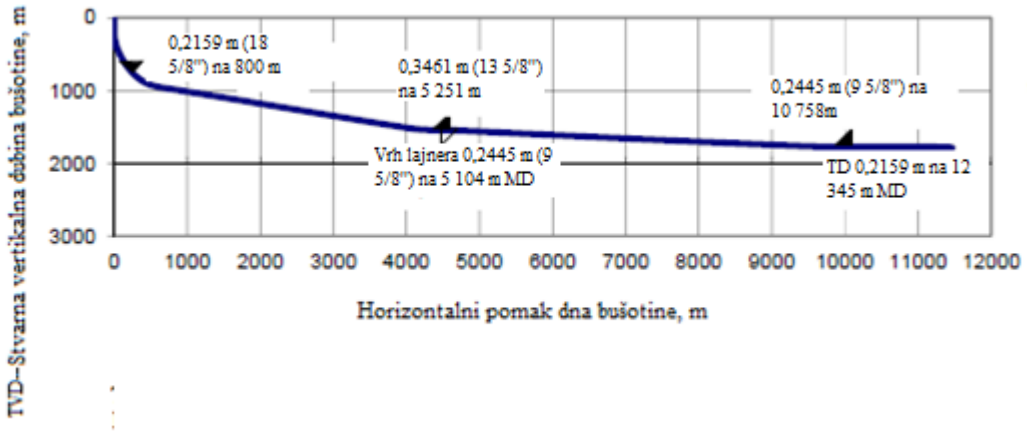
in.) dublje omogućila je i da lajner promjera 0,2445 m (9 5/8 in.) bude ili u cijelosti ili većim dijelom unutar sigurne granice kolone zaštitnih cijevi promjera 0,3461 m (13 5/8 in.). Lajner je ugrađen pomoću niza bušaćih šipki promjera 0,1683 m (6 5/8 in.) Operator je također istaknuo da je opterećenje uslijed izvijanja bušaćih šipki promjera 0,1492 m (5 7/8 in.) počelo limitirati iznos opterećenja na dlijeto koje bi moglo biti primijenjeno u kanalu bušotine promjera 0,3111 m (12 ¼ in.). Za ublažavanje problema izvijanja korištene su bušaće šipke promjera 0,1683 m (6 5/8 in.), pružajući također bolju hidrauliku i čišćenja kanala bušotine (Walker, 2012).

6.2.2. Izrada bušotine OP-11

Bušotina OP-11 je osma horizontalna bušotina velikog dosega izbušena na polju Odoptu. Prilikom njenog dizajniranja objedinjene su sve spoznaje prikupljene tijekom izrade prethodnih sedam bušotina. Bušenjem su postignuti zadani ciljevi odnosno izrađena je bušotina s najvećom duljinom kanala (slika 6-4). Trajektorija kanala bušotine prikazana je na slici 6-5 (Walker, 2012).



Slika 6-4. Doseg bušotine OP-11 u odnosu na doseg ostalih bušotina u svijetu (Walker, 2012)



Slika 6-5. Trajektorija kanala bušotine OP-11 na polju Odoptu, Sakhalin (Walker, 2012)

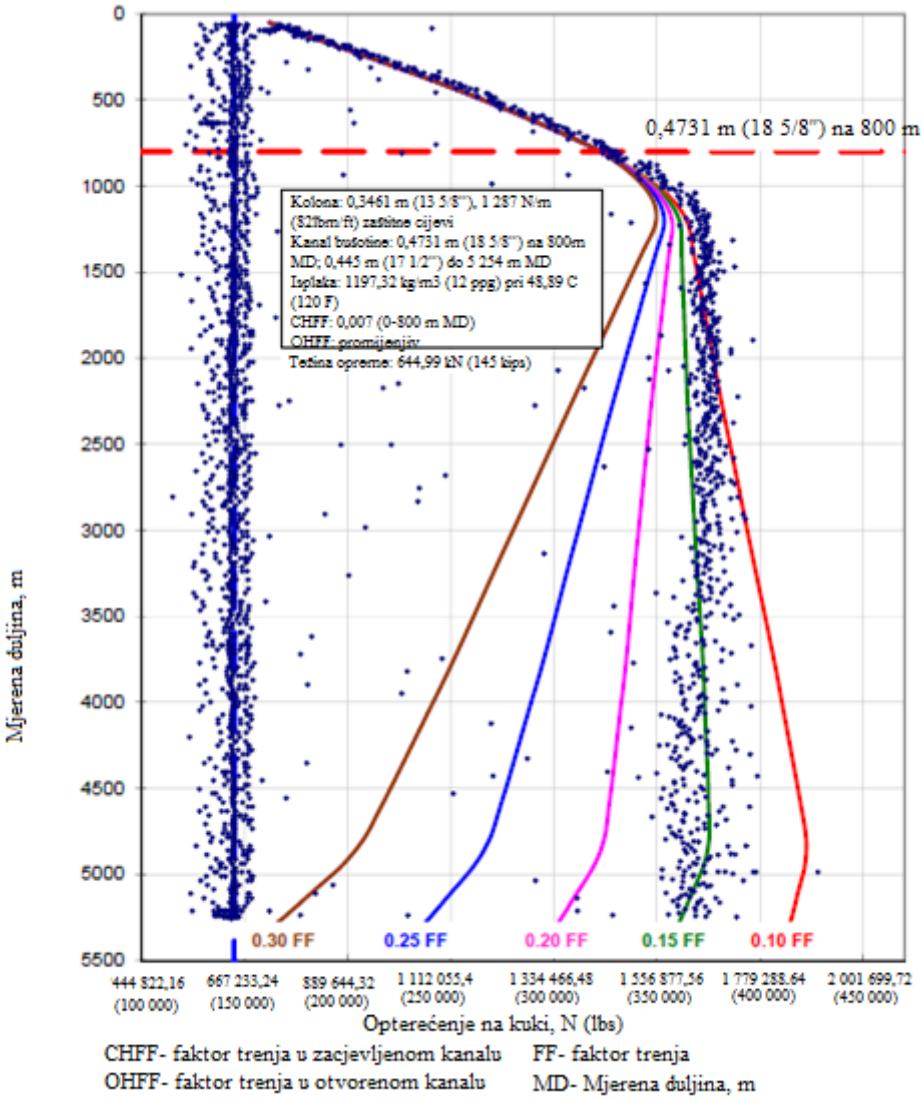
6.2.3. Tijek izrade bušotine OP-11

Serijska ugradnja (*engl. batch setting operations*) je korišteno za ugradnju konduktor kolone promjera 0,762 m (30 in.) kao i za bušenje kanala bušotine promjera 0,6096 m (24 in.) i ugradnju kolone zaštitnih cijevi 0,4731 m (18 5/8 in.). To omogućava povećanje učinkovitosti ponavljanjem operacija i smanjenjem zamjena isplake na bazi vode s isplakom koja nije na bazi vode (NAF). Korištenjem bušaćeg postrojenja Yastreb, konduktor kolona promjera 0,762 m (30in.) je ugrađena do dubine od 81 m s jednim čišćenjem i s dubinskim bušaćim sklopom promjera 0,6096 m (24 in.). Operator je zaključio da bušenjem dijela početnog kanala kose bušotine (*engl. pilot hole*) omogućava učinkovito potiskivanje konduktor kolone. Ispod konduktor kolone promjera 0,762 m (30 in.), izbušen je kanal bušotine promjera 0,6096 m (24 in.) koristeći dubinski motor s 1,15˚ podesivim kućištem i uređajem za mjerenje tijekom bušenja, koristeći isplaku na bazi vode. Na dubini od 180 m započelo se s povećanjem kuta otklona sve do konačne dubine od 800 m mjerene dubine/739 m stvarne vertikalne dubine kada je postignut kut otklona od 41˚. Povećanje kuta otklona iznosilo je od 1 do 3,5 stupnjeva na 30 m. Zatim je kolona zaštitnih cijevi promjera 0,4731 m (18 5/8 in.) ugrađena i cementirana do površine, kroz kolonu bušaćih alatki**.** Za bušotinu OP-11 ove operacije su trajale približno 7 dana (Walker, 2012).

6.2.4. Izrada i zacjevljenje kanala bušotine promjera 0,4445 m (17 ½ in.)

Nakon postavljanja i testiranja preventera, dubinski bušaći sklop (BHA) promjera 0,4445 m (17 ½ in.) sastavljen od dlijeta, rotirajućeg upravljivog sustava koji „gura“ dlijeto i sustava za mjerenje tijekom bušenja (MWD) spušten je u bušotinu na bušaćim šipkama promjera 0,1683 m (6 5/8 in.). Niz bušaćih alatki dizajniran je na temelju posljednjih spoznaja o dubinskom bušaćem sklopu i dizajnu dlijeta s prethodnih bušotina izrađenih na Odoptu polju što je rezultiralo značajnim poboljšanjem u smanjenju vibracije, te povećanje upravljivosti, i sveukupnoj brzini bušenja (Walker, 2012). Nakon spuštanja dubinskog bušaćeg sklopa u bušotinu, isplaka na bazi vode je zamijenjena s isplakom koja nije na bazi vode (NAF) gustoće 1 437,92 kg/m^3 (12,0 ppg), izbušena je zaustavna ploča i cementni kamen ispod prethodno ugrađene i cementirane kolone (*engl. float equipment*) te je proveden test primanja naslaga s isplakom gustoće 1 737,48 kg/m^3 (14,5 ppg). Kanal bušotine je zatim izbušen usmjereno, s porastom kuta otklona do 81˚ na 1 250 m mjerene duljine. Na dubini od 4 700 m započeto je drugo povećanje kuta otklona čime je postignut planirani otklon od 87˚ na 4 900 m mjerene duljine. Nastavljeno je bušenje kanala bušotine do konačne dubine bušotine 5 254 m mjerene duljine (MD)/1 543 m stvarne vertikalne dubine (TVD). To je bilo pliće za 46 m od planiranog i rezultat je kontinuiranog povećanja kuta otklona dubinskog bušaćeg sklopa (BHA). Nakon dostizanja 5 254 m mjerene duljine, iz bušotine je izvađen niz alatki uz istovremenu cirkulaciju i rotaciju bez indikacija o nestabilnosti kanala bušotine. Jedan stabilizator bio je iznimno oštećen (što je rezultiralo u tendenciji povećanja kuta otklona). Kako je oštećenje stabilizatora nastavljeno, postalo je sve teže da se rotirajućim upravljivim sustavom savlada tendencija povećanja kuta otklona te su na kraju uočene veće bočne vibracije i lijepljenje niza alatki za stijenke kanala bušotine. Ova sekcija od 4 454 m je izbušena u jednom spuštanju alatki, te korištenjem sklopa promjera 0,4445 m (17 ½ in.) što predstavlja rekord za davatelja usluge usmjerenog bušenja. Standardni operativni parametri za ovu sekciju su protok (dobava) od 0,08012 m^3/s (1 270 gpm; 4 807 l/min), opterećenje na dlijeto 177,93 kN (40 klb) i brzina rotacije od 160 okr/min. Maksimalna torzija tijekom bušenja bila je 61 011,81 Nm (45 kft/lb) a prosječna brzina bušenja 100 m/h (150 m/h na početku bušenja). Na šest vibratora koji se nalaze na postrojenju postavljena su sita kojima se smanjuje sadržaj pijeska u isplaci, kako bi se izbjeglo zatajenje opreme zbog erozije koje je uočeno na prethodnim bušotinama. Kolona zaštitnih cijevi promjera 0,3461 m (13 5/8 in.) je ispunjena isplakom i

ugrađene do konačne dubine bez poteškoća. Slika 6-6 prikazuje smanjenje opterećenja na kuki tijekom ugradnje kolone zaštitnih cijevi promjera 0,3461 m (13 5/8 in.). Nakon toga kolona zaštitnih cijevi je cementirana konvencionalnom metodom. Završetak ove sekcije trajao je oko 11 dana (bušenje, ugradnja i cementiranje kolone zaštitnih cijevi) (Walker, 2012).



Slika 6-6. Smanjenje opterećenja na kuki tijekom ugradnje kolone zaštitnih cijevi promjera 0,3461 m (13 5/8 in.) (Walker, 2012)

6.2.5. Izrada i zacjevljenje kanala bušotine promjera 0,31115 m (12 ¼ in.)

Bušaći sklop (BHA) promjera 0,31115 m (12 ¼ in.) bio je sastavljen od dlijeta, upravljivog bušaćeg sustava koji upravlja dlijetom preko zglobne osovine i sklopa za mjerenje tijekom bušenja. Dlijeto ima suženi spiralni uređaj promjera 0,1524 m (6 in.) s rezovima u području nosa. Iznad dubinskog bušaćeg sklopa (BHA), postavljene su teške bušaće šipke i mehanički udarač (*engl. jars*), nakon njih 3 500 m bušaćih šipki promjera 0,1683 m (6 5/8 in.), a zatim na vrhu kolone bušaće šipke promjera 0,1492 m (5 7/8 in.) sa spojnicama koji se dotežu s velikim momentom (*engl. premium high-torque connections*). Bušaće šipke promjera 0,1683 m (6 5/8 in.) postavljena su na dnu niza bušaćih alatki jer je tamo najveće naprezanje zbog izvijanja, i ostvaruje se i dodatna korist jer se povećava brzina strujanja u prstenastom prostoru, što pomaže u čišćenju kanala bušotine. Po planu bušotina je izbušena uz ispiranje isplakom gustoće 1 497,83 kg/m^3 (12,5 ppg), s dobavom od 0,07255 m^3/s (1 150 gpm; 4 353 l/min). Uz primjenu usmjerenog sklopa bušenje se odvijalo po planu, zadržavajući kut tangente od 87˚. Zatim je ostvareno povećanje kuta otklona do horizontale na 10 500 m mjerene duljine (MD), dosezajući konačnu dubinu bušotine na 10 758 m mjerene duljine (MD)/1 774 m stvarne vertikalne dubine (TVD). Na mjerenoj duljini kanala (MD) od 9 900 m torzija tijekom bušenja dosegla je iznos od 81 349,077 Nm (60 kft/lb) pa su podmazivači dodani u isplaku kako bi se ona smanjila. Kod konačne dubine bušotine, zakretni moment je bio otprilike od 79 993,26 do 84 060,71 Nm (59-62 kft/lbs). Same vibracije i lijepljenje niza alatki za stijenke kanala bušotine, u kanalu bušotine promjera 0,31115 m (12 ¼ in.) su bile vrlo male osim u slučajevima kada je na početku sekcije došlo do izmjene slojeva pješčenjaka i šejlova. Sekcija duljine 5 504 m izbušena je uz prosječnu brzinu bušenja od 46 m/h. Nakon dostizanja konačne dubine bušotine (TD), kanal bušotine je pročišćen, uz istovremenu rotaciju i ispiranje, sve do unutar zaštitne cijevi promjera 0,3461 m (13 5/8 in.), s minimalnim naznakama o proširenjima zbog zarušavanja. Nakon izvlačenja dlijeto je klasificirano kao 3-2-CT, a nekoliko je stabilizatora bilo vidljivo oštećeno. Plutajući lajner (*engl. floated liner*) promjera 0,2445 m (9 5/8 in.), jedinične težine 686 N/m (47 lb/ft) ugrađen je bez rotacije na bušaćim šipkama promjera 0,1683 m (6 5/8 in.) ispunjenim isplakom (Walker, 2012).

Tijekom ugradnje lajnera, opterećenje na kuki je općenito vrlo malo, i guranje kolone s vršnim pogonom bušaćeg postrojenja silom od 22,24 do 35,58 kN (od 5 do 8 klb) je čest način za ubrzavanje ugradnje lajnera. Nakon postavljanja vješalice lajnera na vrhu

lajnera, dodaju se bušaće šipke promjera 0,1683 m (6 5/8 in.), te se cijeli niz ispuni isplakom, što omogućava povećanje opterećenja na kuki, time pružajući dodatnu silu za guranje lajnera ispunjenog zrakom (*engl. air-filled liner*). Prijelaz u vješalici lajnera omogućio je razdvajanje bušaćih šipki ispunjenih isplakom od lajnera ispunjenog zrakom koji je ispod nje. Rotiranje lajnera je također moguće, ali to nije bio slučaj kod ugradnje lajnera na polju Odoptu. Po mogućnosti kompletan lajner promjera 0,2445 m (9 5/8 in.) će ostati unutar zaštitne cijevi promjera 0,3461 m (13 5/8 in.) dok se ne postavi vješalica lajnera. Nakon što se lajner ugradi u otvoreni kanal bušotine, primjenom vršnog pogona bušaćeg postrojenja (*engl. top drive*) on se može rotirati na koloni bušaćih šipki. U stvarnosti, na bušotini OP-11 otprilike 400 m zaštitnih cijevi promjera 0,2445 m (9 5/8 in.) je nadodano u otvoreni kanal bušotine tijekom dva sata dok se postavljala vješalica lajnera (Walker, 2012).

Lajner promjera 0,2445 m (9 5/8 in.) je dizajniran da se postavi horizontalno netom prije ulaska kanala bušotine u ležište zasićeno ugljikovodicima. Kod izrade ove sekcije kanala bušotine na susjednim bušotinama promjera 0,3111 m (12 ¼ in.) zabilježena je nestabilnost kanala bušotine zbog čega je gustoća isplake povećana na 1 497,83 kg/m^3 (12,5 ppg), ranije u programu. U tim uvjetima lajner promjera 0,2445 m (9 5/8 in.) i jedinične težine 686 N/m (47 lb/ft) koji je ispunjen zrakom je u plutajućem stanju tijekom ugradnje. Svako povećanje gustoće isplake rezultirat će podizanjem lajnera i povećat će silu potrebnu za njegovu ugradnju u bušotinu (Walker, 2012).

Nakon što je lajner ugrađen do dna, cijela kolona zaštitnih cijevi je ispunjena isplakom, obavljena je cirkulacija, vješalica lajnera je postavljena, a zaštitne cijevi su cementirane. Gornji paker na lajneru (*engl. liner top packer*) je aktiviran rotiranjem bušaćih šipki (da se nadvlada aksijalno trenje) s nasjedom od 266,89 kN (60 kip). Nakon aktivacije gornji paker je testiran na tlak do 25 510,6 kPa (3 700 psi), a alatke su nakon toga izvučene iz kanala bušotine. Izrada i zacjevljenje kanala bušotine promjera 0,31115 m (12 ¼ in.) trajalo je 20,6 dana (Walker, 2012).

6.2.6. Izrada kanala bušotine promjera 0,2159 m (8 ½ in.) te završno proizvodno opremanje gornjeg i donjeg dijela kanala bušotine

U odnosu na prethodno opisan dizajn dubinskog bušaćeg sklopa (BHA) promjera 0,2159 m (8 ½ in.), sastav alatki je bio nešto izmijenjen i sastojao se od dlijeta, rotirajućeg upravljivog sustava koji usmjerava dlijeto pomoću zglobne osovine, alata za karotažna mjerenja, sklopa za mjerenje tijekom bušenja (MWD), teških bušaćih šipki, mehaničkog udarača i 7 900 m bušaćih šipki promjera 0,1492 m (5 7/8 in.) i 0,1683 m (6 5/8 in.). Ispod 8 500 m kolona bušaćih alatki se nije mogla više spustiti u bušotinu na elevatoru, već se sklop rotirao u kanalu bušotine. Nakon ulaska u stijenu ispod pete kolone zastitnih cijevi promjera (9 5/8 in.) napravljen je test primanja naslaga (*engl. leak-off test*) do tlaka koji odgovara gustoći od 2 156,87 kg/m^3 (18 ppg) korištenjem isplake koja nije na bazi vode gustoće 1 485,85 kg/m^3 (12,4 ppg) (Walker, 2012). Pri bušenju ove sekcije zakretni moment pri dnu se kretao između 78 637,44 i 88 128,17 Nm (58-65 kft/lb). Dobava je smanjena kad je vrijednost ekvivalentne cirkulacijske gustoće isplake približila vrijednosti čvrstoće formacije, te je uglavnom iznosila 0,03155 m^3/s (500 gpm; 1,893 l/min) (Walker, 2012). To je imalo dodatnu korist zbog smanjenja hidrauličkog podizanja bušaćih šipki što je rezultiralo u boljem prijenosu težine na dlijeto. Kako udarci i vibracije iznad dna mogu biti jače izraženi od onih pri dnu, izvlačenje šipki uz istovremeno rotaciju i ispiranje je limitirano na 3 m sa smanjenom brzinom rotacije po minuti (radi smanjenja udaraca i vibracija). Istodobno je brzina bušenja kroz ležište bila ograničena na 65 m/h radi dobivanja boljih podataka mjerenja i bolje procjene formacije. U ovoj sekciji kanala bušotine ukupno je izvedeno 21 ispitivanje slojnog tlaka (*engl. formation pressure test*). Kanal bušotine promjera 0,2159 m (8 ½ in.) i duljine 1 587 m izbušen je za cca 11 dana (Walker, 2012).

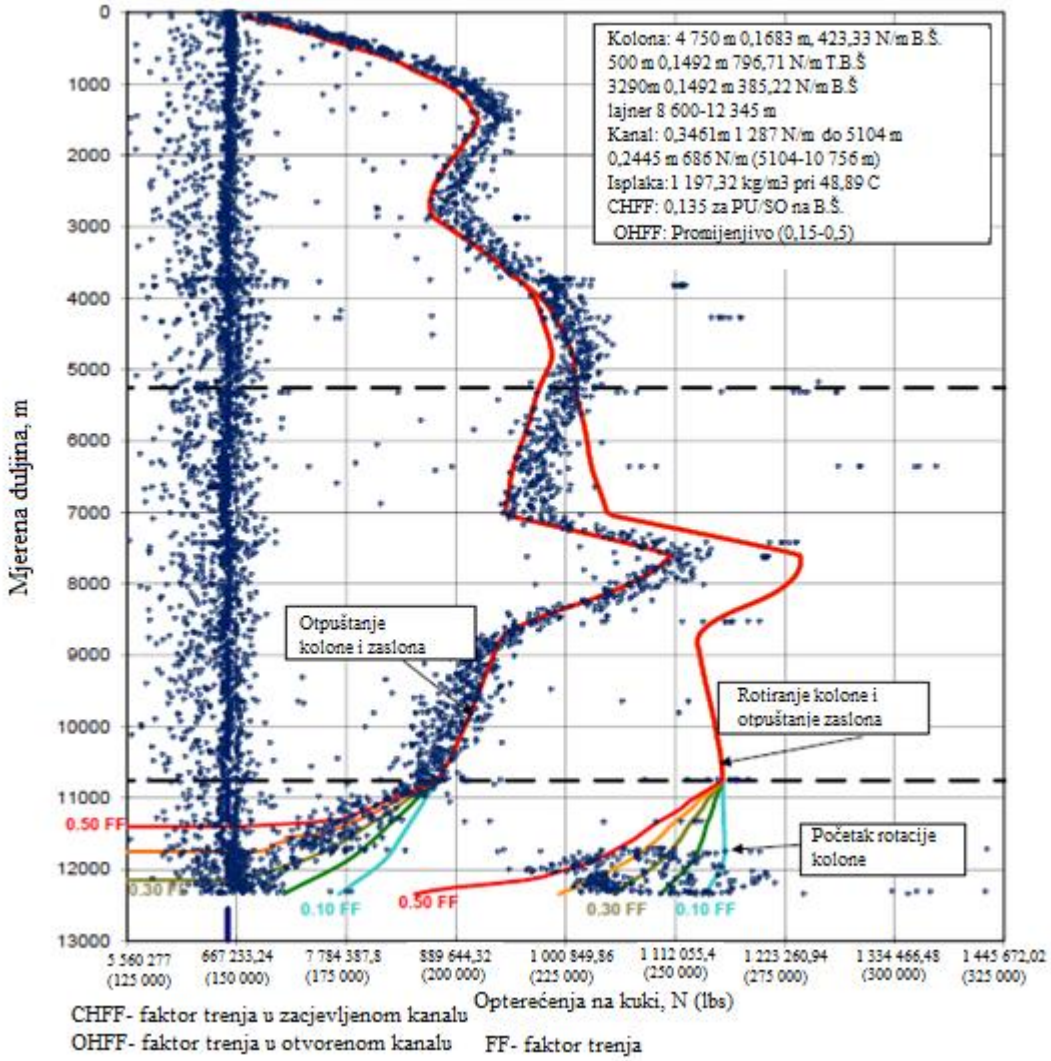
Ovaj dio kanala bušotine je dizajniran da bude izbušen horizontalno i da bude u kontaktu s višestrukim slojevima ugljikovodika čineći promjenu azimuta od 125˚ na 90˚. Pri kraju sekcije, otklon bušotine je smanjen na 87˚ da bi se smanjila cjelokupna duljina sekcije. Ekvivalentna cirkulacijska gustoća isplake predstavljala je značajan problem u ovoj sekciji, jer su korištene bušaće šipke promjera 0,1492 m (5 7/8 in.) unutar lajnera promjera 0,2445 m (9 5/8 in.) i kanala bušotine promjera 0,2159 m (8 ½ in.), s bušaćim šipkama promjera 0,1683 m (6 5/8 in.) iznad vrha lajnera. Ovaj dizajn omogućavao je značajnu otpornost alatki na izvijanje i torziju. U ovom slučaju može doći do prividnog

povećanja gustoća za 479,31 do 718,96 kg/m^3 (4-6 ppg) ovisno o brzini protjecanja isplake. Dodavanjem tekućih podmazivača u isplaku smanjena je torzija, poboljšan prijenos težine i smanjeno aksijalno trenje (Walker, 2012).

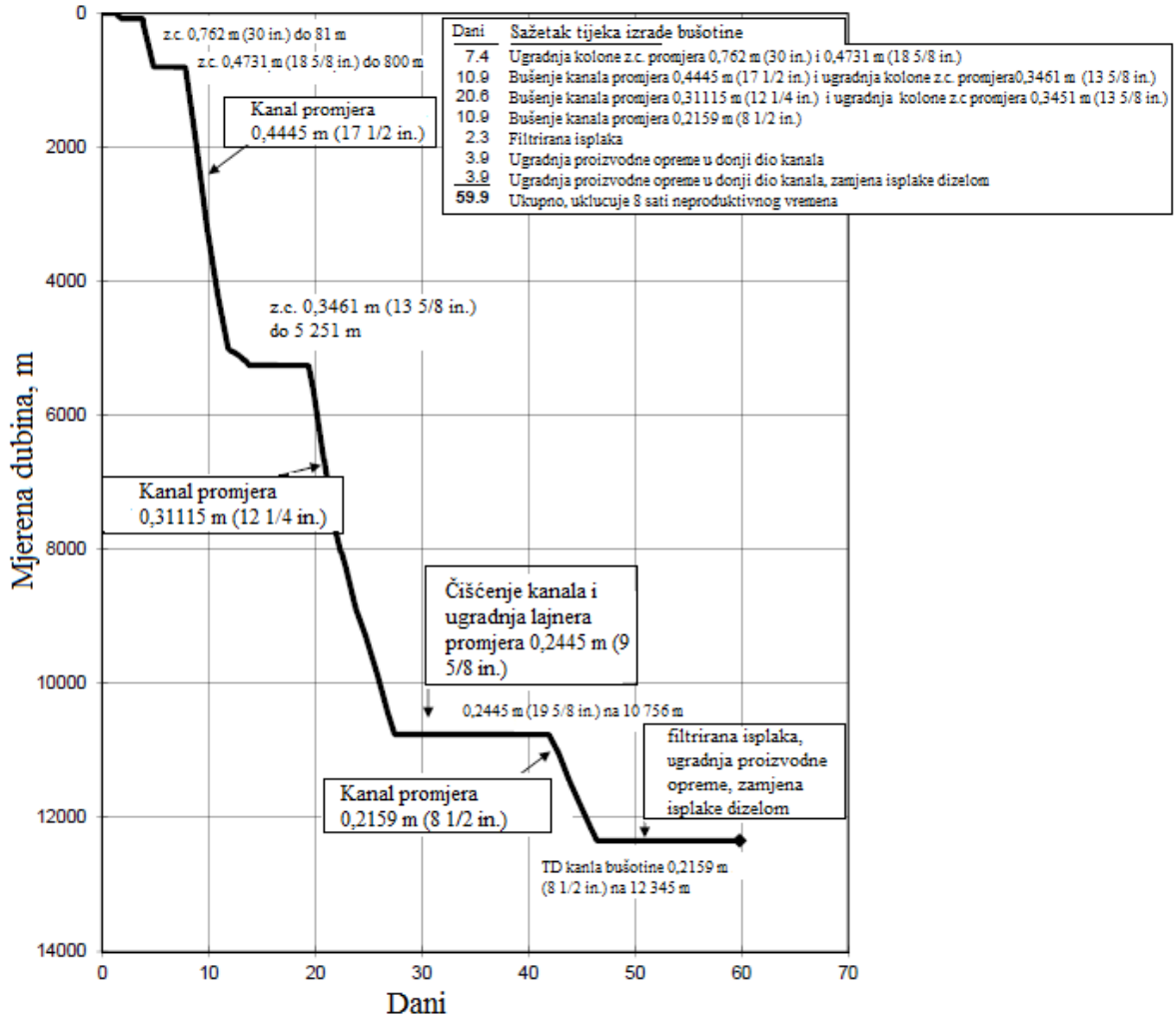
U mnogim bušotinama velikog horizontalnog dosega, operator je zamijetio smanjenje opterećenja na kuki kada pumpe rade, naročito za vrijeme bušenja sekcija manjih promjera (npr. 0,2159 m (8 ½ in.)). Hidrauličke sile (tlak i smicanje) koje djeluju duž niza bušaćih alatki, smanjuju opterećenje na kuki i ostvaruju dodatno tlačno opterećenje na bušaćim šipkama. Za bušotine velikog horizontalnog dosega (ERD) kao što je ova, zamijećeno je smanjenje opterećenja na kuki od 177,93 do 222,41 kN (40-50 kip) nakon uključivanja pumpi za postizanje potrebne dobave. Izvijanje bušaće šipke, veći zakretni moment na površini i loše prenošenje opterećenje na dlijeto ovisili su o dizajnu bušotine i odabiru bušaćih šipki. Zabilježeno je da nakon dosegnute granice izvijanja, relativno malo smanjenje dobave može poboljšati prijenos težine i značajno povećati brzinu bušenja (Walker, 2012). Od izuzetne važnosti na tim dubinama je potreba za održavanjem ispravnog rada dubinskog bušaćeg sklopa (BHA) u bušotini. Zamjena neispravnog (oštećenog) dijela dubinskog bušaćeg sklopa na ekstremnim dubinama može trajati 5 do 6 dana. Smanjenje vibracije je od izuzetne važnosti u očuvanju i produljenju rada alatki u bušotini. Izvođač radova usmjerenog bušenja mora biti izravno i aktivno uključen u održavanje dubinskih alatki, osigurati njihov neophodni redizajn i aktivno se uključiti u pravovremeno smanjenje vibracija (Walker, 2012).

Dizajn proizvodnog opremanja bušotina na polju Odoptu je preuzet s polja Chayvo. Proizvodno opremanje donjeg dijela bušotine sastoji se od ugradnje: ugradnje lajnera u otvoreni kanal bušotine promjera 0,2159 m (8 ½ in.) filtara, uređaja za mjerenje pritjecanje fluida u bušotinu i bubrećih pakera nakon. Zbog plitke stvarne vertikalne dubine bušotine (TVD) i profila horizontalne bušotine velikog dosega (ERD), oprema za proizvodno opremanje donjeg dijela kanala bušotine nije mogla biti postavljena samo spuštanjem. Prema tome, rotirajući alat (*engl. swivel tool*) je korišten kako bi se omogućila rotacija iznad filtara (*engl. screens*), čime je otklonjeno aksijalno trenje i omogućena potrebna dodatna sila za postavljanje ne-rotirajućeg donjeg dijela proizvodne opreme. Proizvodna oprema gornjeg dijela bušotine je postavljena bez rotacije. Osim korištenja rotirajuće alatke (*engl. swivel tool*), proizvodno opremanje bušotina bila je nepromijenjeno u odnosu na opremanje bušotina na polju Chayvo (Walker, 2012).

Nakon dosezanja konačne dubine bušotine (TD) na 12 345 m mjerene duljine (MD)/1 784 m stvarne vertikalne dubine (TVD), sekcija otvorenog kanala bušotine je pročišćena izvlačenjem bušaćeg alata uz istovremenu cirkulaciju, zatim je dubinski bušaći sklop spušten uz rotaciju do konačne dubine bušotine (negativna težina), a postojeća isplaka u kanalu bušotine je zamijenjena s filtriranom isplakom koja nije na bazi vode (NAF) (potrebna da ne dođe čepljenje filtara). Osim toga dodan je i tekući podmazivač radi lakše ugradnje opreme za proizvodno opremanje bušotine. Proizvodnog opremanja donjeg dijela kanala duljine 3 740 m, sastoji se od: filtara promjera 0,1397 m (5 ½ in.), neperforirane šipke, uređaja za mjerenje dotoka fluida u bušotinu, te bubrećih pakera. Nakon njihove ugradnje ugrađene su vješalica lajnera i rotirajuća alatka (*engl. swivel tool*). Sklop je ugrađen na nizu za ugradnju koji se sastojao od bušaćih i teških bušaćih šipki promjera 0,1492 m (5 7/8 in.) i bušaćih šipki promjera 0,1683 m (6 5/8 in.). Kao što je predviđeno, nije bilo moguće uspješno postaviti proizvodni niz u kanal bušotine bez rotacije niza tijekom ugradnje (*engl. landing string*). Na slici 6-7. prikazano je smanjenje opterećenja na kuki za ugradnju donjeg dijela proizvodne opreme, i pokazuje da na dubini od 1 170 m izvršena je rotacija sklopa za postavljanje da bi se nastavilo potiskivanje. U trenutku kad je ugrađen donji dio proizvodne opreme u bušotinu, postavljena je vješalica lajnera, te za ugradnju alatke. Iznad vješalice lajnera filtrirana isplaka gustoće 1 473,86 kg/m^3 (12,3 ppg) zamijenjena je s isplakom koja nije na bazi vode (NAF) gustoće 1 138,35 kg/m^3 (9,5 ppg) radi lakše ugradnje gornjeg dijela proizvodne opreme u bušotinu i naknadno je zamijenjena dizelom (Walker, 2012). Gornji dio proizvodne opreme sastoji se od tubinga promjera 0,1397 m (5 ½ in.), dubinskih uređaja za mjerenje tlakova, vretena za postavljanje ventila za plinski lift, te je ugrađen sigurnosni ventil. Zatim je obavljena cirkulacija, aktiviran je paker, a bušotina je puštena u proizvodnju. Ugradnja gornje i donje proizvodne opreme u bušotinu i zamjena isplake dizelom trajalo je otprilike 10 dana i bušotina OP-11 je dovršena 7. siječnja 2011. godine (Walker, 2012). Slika 6-8. prikazuje vrijeme trajanja izrade bušotine.



Slika 6-7. Opterećenje na kuki tijekom ugradnje proizvodne opreme u donji dio kanala (Walker, 2012)



Slika 6-8. Vrijeme trajanja izrade bušotine OP-11 (Walker, 2012)

6.3. Izrada horizontalne bušotine velikog dosega u svijetu – Saudijska Arabija

U primjeru će biti prikazana primjena inovativne rotirajuće alatke za smanjenje trenja radi lakše ugradnje najduljeg lajnera promjera 0,1778 m (7 in.) u bušotinu A koja se nalazi u Saudijskoj Arabiji.

Odobalna polja u Saudijskoj Arabiji se razvijaju na temelju optimalnog korištenja kopnenih bušaćih postrojenja. Umjesto razrade polja isključivo s odobalnih (*engl. offshore*) platformi, polja su djelomično razrađena s međusobno povezanih umjetnih otoka. Bušotine velikog horizontalnog dosega (ERD) su nužne za optimalno korištenje površine lokacije i za maksimalni kontakt s ležištem (Okot et al., 2015).

Tijekom izrade bušotina bilo je problema tijekom faze bušenja za lajner i tijekom spuštanja lajnera do ciljane dubine bušotine (TD). Geometrija kanala bušotine, problemi nestabilnosti kanala bušotine i sile torzije i natega, ograničuju mogućnost ugradnje lajnera do planirane dubine, čime se tehnički ograničava moguća proizvodnja nafte i plina (Okot et al., 2015).

Glavni izazov u postavljanju lajnera kroz produljene lateralne sekcije je pomanjkanje opterećenja na kuki potrebnog za guranje lajnera do konačne dubine, i sposobnosti da se rotira bušaće šipke bez rotiranja lajnera. Kako je izrada horizontalnih bušotina velikog dosega postala česta praksa, nužno je implementirati nove prakse postavljanja lajnera i alatki koji rotiraju bušaće šipke iznad lajnera, za prevladavanje trenja, i omogućiti veću raspoloživu težinu koju se može primijeniti za ugradnju lajnera ili proizvodne opreme do konačne dubine bušotine (Okot et al., 2015).

Jedno odobalno polje u Saudijskoj Arabiji ima vrlo plitko ležište koje se nalazi na otprilike 1 219,2 m (4 000 ft) stvarne vertikalne dubine, a leži ispod stambenog naselja. Planirana je da se eksploatacija nafte odvija kroz bušotinu opremljenu s lajnerom promjera 0,1778 m (7 in.). To je zahtijevalo primjenu novih uređaja za smanjenje trenja. Dizajn horizontalnih bušotina velikog dosega (sa umjetnih otoka) je postao izuzetno važan za postizanje povećanja kontakta bušotine s ležištem i eksploataciju ugljikovodika blizu naselja (Okot et al., 2015).

Tijekom izrade horizontalnih bušotina velikog dosega, a zbog njihove tipične povećane duljine i jako otklonjenog kanala uočeno je veliko trenje tijekom ugradnje kolone zaštitnih cijevi, lajnera i/ili proizvodne opreme. Zbog ograničene otpornosti lajnera i

komponenti proizvodne opreme bušotine na torziju, većina opreme je ugrađena klizno (*engl. slacked off*) do konačne dubine. Tijekom operacije spuštanja, raspoloživa težina na površini je smanjena zbog trenja (*engl. frictional drag*). Prije nego što cijevi dosegnu konačnu dubinu sama težina cijevi prestaje biti dovoljna da se cijev protisne do dna. Pod konvencionalnom metodom spuštanja, akumulirano trenje zbog natega duž kolone ograničiti će maksimalni doseg.

Prvi pristup koji omogućava spuštanje kolone bušaćih alatki do veće dubine je omogućiti veću raspoloživu težinu (opterećenje) na površini. To se može postići korištenjem u nizu alatki teških bušaćih šipki i/ili teških šipki, najčešće u vertikalnoj sekciji kanala bušotine. Ovisno o profilu bušotine, vertikalna sekcija možda neće omogućiti dovoljni porast težine. Takav pristup bio bi ograničen praksom rukovanja teškim šipkama, troškovima mobilizacije, ograničenjima postrojenja (nategom i torzijom). Konačno ovim rješenjem se niz bušaćih alatki opterećuje tlačno što drastično povećava rizik od njihovog izvijanja (Okot et al., 2015).

Umjesto da se traži kako povećati predviđenu težinu u sustavu za spuštanje, drugi pristup bi bio smanjiti težinu na koju utječe trenje uslijed natega kada se spušta kolona u kanal bušotine. Uzimajući u obzir utjecaj na zdravlje, sigurnost i okoliš, ekonomske i dr. faktore (npr. litologija), upotreba isplake na bazi ulja je bila česta opcija za bušenje bušotina velikog dosega u usporedbi s isplakom na bazi vode s dodanim podmazivačima. Upotreba specijalnih krutih podmazivača bila je djelotvorna u smanjenju faktora trenja, osobito tijekom spuštanja zaštitnih cijevi/lajnera do konačne dubine bušotine (TD) (Okot et al., 2015).

Danas postoje razna rješenja koje omogućuju smanjenje trenja: klizni kruti centralizeri na lajneru, specijalni prijelazi (*engl. roller bearing subs*), ili nerotirajući zaštitni prsten bušaćih šipki postavljeni na kolonu bušaćih alatki. Takvo mehaničko rješenje zahtjeva manipuliranje različitim alatkama, zahtjeva posebno održavanje i zahvate koji mogu povećati neproduktivno vrijeme. Kako je mnogo alata potrebno koristiti za smanjenje trenje, povećan je rizik od problema. Nekima od tih alatki smanjuje se učinak zbog trošenja u teškim uvjetima rada. Konačno, korištenje ovih različitih alatki ima utjecaj na ekvivalentnu cirkulacijsku gustoću isplake i na ukupan tlak isplačne sisaljke (*engl. stand-pipe pressure - SPP*) koji treba kontrolirati tijekom operacije izrade bušotine (Okot et al., 2015).

Drugo rješenje za smanjenje trenja je smanjenje sile na kontaktu niza i kanala bušotine. To se može postići upotrebom šipki izrađenih od lakših materijala kao što su aluminij ili titanij ili puštanjem dijela kolone zaštitnih cijevi da pluta. Šipke male težine se ne koriste često i povećavaju logistička ograničenja, one imaju vlastita ograničenja. Druga opcija je, plutanje zaštitnih cijevi, sprječava cirkulaciju i stvara velike mjehuriće koje je potrebno eliminirati, sa svim sigurnosnim problemima povezanim s takvom operacijom (Okot et al., 2015).

Aksijalnim kretanjem smanjuje se statičko trenje. S povećanjem opterećenja niza, konačno se doseže točka gdje su sile statičkog trenja ujednačene i započinje kretanje niza. U tom trenutku trenje se smanjuje, do vrijednosti dinamičkog koeficijenta trenja, a niz alatki ubrzava sve dok se sile ponovno ne ujednače. Rotiranjem niza alatki također se eliminira statičko trenje. To omogućava manevriranje bušaćim nizom s manjom silom i ostavlja veću raspoloživu težinu na kuki (Okot et al., 2015).

Rotacija donosi više nego samo smanjenje dinamičkog koeficijenta trenja: po definiciji sila trenje djeluje u smjeru suprotnom relativnom klizanju dva tijela koja su u kontaktu odnosno ona se protivi klizanju jednoga tijela uz drugo dok se tijela međusobno pritišću. Prilikom spuštanja proizvodne opreme u bušotinu, bez rotacije, ukupno trenje se sastoji od aksijalne sile natega (*engl. axial drag force*), uz postupno preuzimanje značajnog dijela opterećenja raspoloživog sa površine. Kombinirajući brzinu manevriranja niza bušaćih alatki s brzinom rotacije, trenje rezultira iz kombinacije aksijalne komponente (nateg) i tangencijalne komponente, koja se prenosi na niz bušaćih alatki kroz torziju. Što je manja brzina manevriranja niza bušaćih alatki u odnosu na brzinu rotacije, to će veće trenje biti pretvoreno u torziju uz daljnje smanjenje natega (Okot et al., 2015).

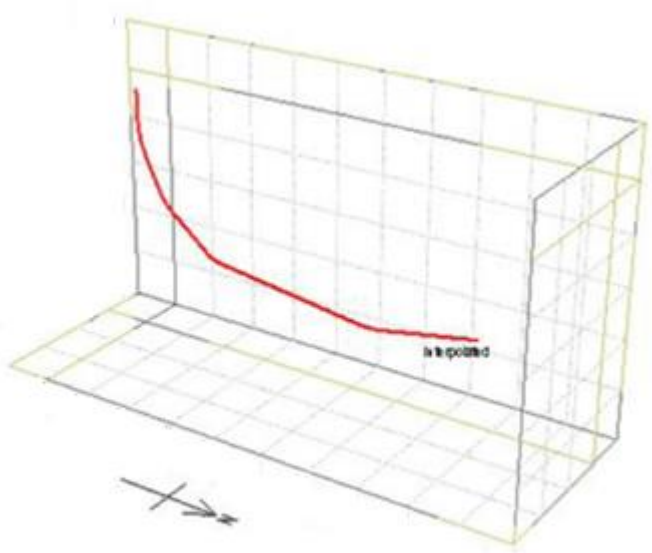
6.3.1. Dizajn bušotina Manifa polja

Prva primjena rotirajuće alatke za smanjenje trenja (*engl. rotatable friction reduction tool or swivel tool*) bila je tijekom izrade bušotine Well A na Manifa polju, Saudi. Alatka razdvaja niz bušaćih alatki na dva dijela, gornji radni niz (*engl. working string*) koji rotira i donji niz (*engl. landing string*) koji ne rotira već kliže do konačne dubine. Dio natega nastalog duž gornjeg niza bušaćih alatki koji rotira pretvara se u torziju, koja se kroz bušaće šipke prenosi do vršnog pogona. U skladu s operativnim zahtjevima navedena

rotirajuća alatka za smanjenje trenja (*engl. swiveling tool*) se može u svakom trenutku zaključati primjenom prethodno određene vrijednosti diferencijalnog tlaka i time omogućiti prenošenje torzije na lajner ili proizvodne opreme koji se ispod nje nalazi. Ova bušotina velikog dosega, dizajnirana je na slijedeći način (Okot et al., 2015):

- izrada kanala bušotine dlijetom promjera 0,5588 m (22 in.) - ugradnja kolone zaštitnih cijevi promjera 0,4731 m (18 5/8 in.) do 316,99 m (1 040 ft) mjerene duljine/stvarne vertikalne dubine, (vertikalni kanal);
- izrada kanala bušotine dlijetom promjera 0,4064 (16 in.) - ugradnja kolone zaštitnih cijevi promjera 0,3461 m (13 5/8 in.) duljine 1 491,08 m (4 892 ft), (otklon kanala 39,37˚);
- izrada kanala bušotine dlijetom promjera 0,3111 m (12 ¼ in.) - ugradnja kolone zaštitnih cijevi promjera 0,2445 m (9 5/8 in.) duljine 3 411,02 m (11 191 ft), (otklon kanala 69,21˚);
- izrada kanala bušotine dlijetom promjera 0,2159 m (8 ½ in.) - ugradnja lajnera promjera 0,1778 m (7 in.) duljine 3 993,88 m do 7 261,86 m dubine (23 825 ft), (otklon kanala 89,59 ˚);
- izrada kanala bušotine dlijetom promjera 0,1556 m (6 1/8 in.) - do 8 949,54 m (29 362 ft) mjerene duljine, (otklon kanala 90,17˚).

Profil bušotine A prikazan je na slici 6-9. Rotirajuća alatka NC50 (*engl. swiveling tool*) promjera 0,127 m (5 in.) prikazana na slici 6-10 je korištena za lakšu ugradnju lajnera promjera 0,1778 m (7 in.) duljine 3 992,88 m (13 100 ft) u otvoreni kanal bušotine promjera 0,2159 m (8 ½ in.) do konačne dubine od 7 261,86 m (23 825 ft). Korišteni niz za ugradnju lajnera sastojao se od bušaćih šipki promjera 0,1397 m (5 ½ in.) i jedinične težine 392 N/m (26,86 ppf) duljine 2 505,46 m (8 220 ft), zatim teških bušaćih šipki promjera 0,1397 m (5 ½ in.) i jedinične težine 847,9 N/m (58,10 ppf) duljine 716,28 m. Rotirajuća alatka NC50 promjera 0,127 m (5 in.) postavljena iznad alatke za ugradnju vješalice lajnera. Ta alatka (NC50) se izvlači nakon obavljanja posla



Slika 6-9. Profil bušotine A izbušene na polju Manifa u Saudijskoj Arabiji (Okot et al., 2015)



Slika 6-10. Rotirajuća alatka NC50 (Okot et al., 2015)

6.3.2. Sažeti opis izrade kanala bušotine A

Na temelju potencijalnih prednosti otkrivenih modeliranjem, prvi test primjene alatke za smanjenje trenja radi lakše ugradnje lajnera promjera 0,1778 m (7 in.) planiran je na Manifa polju. Cilj terenskog ispitivanja bio je pokazati značajni porast dostupnog opterećenja na kuki kod istovremeno rotiranje i spuštanje bušaćih alatki u kanal bušotine (suprotno klizanju), te nakon toga aktiviranje („zaključavanje“) (*engl. „locking“*) alatke kad lajner dosegne konačnu dubinu (Okot et al., 2015).

Tijekom spuštanja, opterećenje na bušaćoj kuki je zabilježeno za svaki pas cijevi. Kao osnovni vodič pristupu, faktor trenja otvorenog kanala bušotine je smanjen do 0,25 tako da prati trend stvarnih terenskih podataka. Kao druga referenca, potencijalne prednosti

koje pruža rotirajuća alatka su unaprijeđene s istim faktorom trenja od 0,25 za cijeli otvoreni kanal bušotine (Okot et al., 2015).

Proizvodno opremanje bušotine dizajnirano je tako da uključuje cementiranje lajnera. Zbog toga je bilo poželjno aktivirati ili zaključati rotirajuću alatku prije početka cementacije, ali nije bilo moguće ispustiti kuglicu, kao što je to uobičajeno. Umjesto toga, bilo je potrebno zaključati rotirajuću alatku povećanjem protoka kroz lajner, što je kao posljedicu stvorilo diferencijalni tlak na samoj alatki zbog pada tlaka povezanog sa zazorom, između kanala bušotine promjera 0,2159 m (8 ½ in.) i samog lajnera promjera 0,1778 m (7 in.), duljine 3 992,88 m (13 100 ft) (Okot et al., 2015).

Prije postavljanja rotirajuće alatke ili sklopa vješalice lajnera, dvije provjere protoka su provedene. Prva provjera protoka je završena kad je lajner dosegao petu predhodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi (približno na 3 383,28 m (11 100 ft) mjerene duljine), odnosno prije nego je peta lajnera dosegnula otvoreni kanal bušotine. Svrha ovog testa je bilo razumijevanje tlakova kod raznih protoka dok je lajner još uvijek unutar cijevi kojoj je poznat unutarnji promjer. Podaci o tlaku isplačne sisaljke (*engl. stand-pipe pressure*) su očitani za protoke od 0,01062 do 0,0212 m^3/s (168,252 i 336 gpm; 637,1 i 1,272 l/min). Opterećenje na kuki (*engl. hookload*) zabilježeno je prilikom spuštanja lajnera promjera 0,1778 m (7") prije prve provjere protoka na otprilike 3 383,28 m (11 100 ft) (Okot et al., 2015).

Postavljanje lajnera promjera 0,1778 m (7") je tada nastavljeno dok cijela duljina lajnera nije postavljena u kanal bušotine. U tom trenutku, peta lajnera je spuštena otprilike 609,6 m (2 000 ft) u otvoreni kanal bušotine. Provjera protoka je zatim ponovljena, i tlak na stojci je ponovno zabilježen. Svrha ove provjere protoka je procjena stvarnog promjera kanala bušotine promjera 0,2159 m (8 ½ in.) - bilo da je to stvarni promjer ili nešto veći promjer, jer bi to imalo utjecaja na protok koji bi bio potreban za aktiviranje rotirajuće alatke na konačnoj dubini, i pomoglo bi u donošenje odluke o potrebnom tlaku koji će se primijeniti za aktiviranje mehanizma za zaključavanje rotirajuće alatke (Okot et al., 2015).

Rezultati dobiveni sa obje provjere protoka uspoređeni su s već obavljenim proračunima, i u skladu s njima je zaključana rotirajuća alatka. Odlučeno je postaviti zatike koji pucaju pri smicanju u iznosu od 7 032, 65 kPa (1 020 psi) diferencijalnog tlaka na alatki. To omogućava cirkulaciju bez preranog aktiviranja rotirajuće alatke, imajući još

uvijek dovoljno „rezerva“ tlaka koji će biti dovoljan za aktivaciju alatki na konačnoj dubini prije početka cementiranja i postavljanja lajnera (Okot et al., 2015).

Nakon što je završena druga provjera protoka,postavljen je sklop vješalice lajnera na vrhu lajnera, te pas teških bušaćih šipki promjera 0,1397 m (5 ½ in.) Zatim je sklop rotirajućih alatki (prijelaz 5" + rotirajuća alatka + prijelaz 5") sastavljen i spušten u kanal bušotine. Iznad rotirajuće alatke postavljeno je 792,48 m (2 600 ft) teških bušaćih šipki promjera 0,1397 m (5 ½ in.), nakon kojih slijedi ostatak bušaćih šipki promjera 0,1397 m (5 ½ in.) (Okot et al., 2015).

Tijekom ugradnje izvedeno je nekoliko rotacija niza. Kad je peta lajnera dosegla dubinu od 5 486,4 m (18 000 ft), izvršena je prva provjera rotacije radi praćenja bilo kakvog porasta opterećenja na kuki. Tijekom provjere rotacije niz šipki je opterećen vlačno i zatim je rotiran pri 20 okr/min. U tom trenutku zabilježena je torzija potrebna za rotiranje od 3 389,54 Nm (2 500 ft-lb), služeći kao potvrda da je rotirajuća alatka stvarno ograničila rotaciju gornjeg radnog niza. Jedan pas bušaćih šipki je spušten u kanal bušotine uz istovremenu rotaciju, tijekom ovog procesa zabilježeno je opterećenje od 1 094,262 kN (246 klbs), oko 71,17 kN (16 klbs) na prethodnom pasu, koji je spušten u kanal bušotine s opterećenjem na kuki od oko 1 023,09 kN (230 klbs) bez rotacije (Okot et al., 2015).

Na dubini od 6 294,12 m (20 650 ft), lajner je zastao *(eng. stood up)* i nije bilo moguće odmah nastaviti s daljnjim spuštanjem u kanal bušotine. Razlog zbog čega se to desilo nije bilo nateg , jer je raspoloživo opterećenje na kuki sve do ove točke (preko 667,23 kN (150 klbs)) bilo više nego dovoljno za prevladavanje natega uzrokovanog spuštanjem lajnera promjera 0,1778 m (7in) u kanal bušotine. Prilikom analize podataka dobivenih tijekom samog bušenja, utvrđeno je da je lajner spušten kroz sekciju od otprilike 60,96 do 91,44 m (200-300 ft) s kontinuiranom naglom promjenom otklona kanala (*engl. dog leg*) u iznosu od 2-3˚, što objašnjava otežanu ugradnju lajnera u kanal bušotine (Okot et al., 2015).

U tom trenutku započeta je cirkulacija da se zaustavi geliranje isplake i da se očisti kanal bušotine. Isplaka je cirkulirana kroz kanal bušotine pod tlakom isplačne sisaljke od 5 515,81 kPa (800 psi) što predstavlja tlak manji od onog potrebnog za zaključavanje rotirajuće alatke, dok se uz istovremeno zadizanje i spuštanje niza što omogućava bolje čišćenje kanala bušotine. Rotacija je započeta s 10 okr/min i porasla je do 30 okr/min uz vertikalno pomicanje niza. Torzija je pažljivo kontrolirana tijekom rotacije, osobito za

vrijeme cirkulacije, da se osigura da će rotirajuća alatka ostati u rotirajućem načinu rada. Torzija na toj dubini je bila u rasponu od 7 592,58 do 10 304,22 Nm (5 600-7 600 ft-lb). Za vrijeme rotacije i vertikalnog kretanja (gore-dolje), protok je povećan sve do 0,007949 m^3/s (126 gpm; 477 l/min). Izmjereni maksimalni tlak na stojci iznosio je 8 756,34 kPa (1 270 psi). Očitanja torzije nisu bitno povećana tijekom ovog procesa, ukazujući da je rotirajuća alatka ostala u rotirajućem načinu rada, kao što je i očekivano. Nakon otprilike jednog sata vertikalnog kretanja alatki, cirkulacije i rotacije, nastavljeno je spuštanje lajnera promjera 0,1778 m (7in.). Dodavanje sljedećeg pasa pri rotacije od 26 okr/min tijekom spuštanja u kanal bušotine, očitano je opterećenja na kuki u iznosu od 1 009,75 kN (227 klbs), približno 66,72 do 111,21 kN (15-25 klbs) više nego što je prethodno zabilježeno (Okot et al., 2015).

Naredna rotacija i cirkulacija završena je na dubini od 6 385,56 m (20 950 ft) sa protokom u iznosu od 0,0053 m^3/s (84 gpm; 318 l/min) (Okot et al., 2015).

Nastavljeno je spuštanje lajnera u kanal bušotine do zadnja dva pasa šipki. Na toj dubini, otpuštanjem opterećenje na kuki tijekom spuštanja u kanal bušotine zabilježena je težina u iznosu od 765, 09 kN (172 klbs). Prethodni pas je rotiran pri 43 okr/min (rezultiranjem u 10 846,54 Nm (8000 ft-lb) torzije na površini) cirkulacija je održavana tijekom ovog procesa a maksimalni protok u iznosu 0,0053 m^3/s (84 gpm; 318 l/min), rezultirajući u tlaku isplačne sisaljke u iznosu od 8 273,71 kPa (1 200 psi). Tijekom rotacije ovog pasa u kanalu bušotine, opterećenje na kuki je bilo otprilike 911,89-934,13 kN (205-210 klbs). Zadnji pas je zatim rotiran prema uz slične parametre, samo što je opterećenje na kuki neznatno smanjeno na 867,4 kN (195 klbs) (Okot et al., 2015).

Kad je konačna dubina postignuta, započeo je proces za aktivaciju rotirajuće alatke. Zabilježena je torzija u iznosu od 10 846,54 Nm (8 000 ft-lb) u rotirajućem načinu rada, ograničenje na vršnom pogonu je postavljeno na 16 405,4 Nm (12 100 ft-lb) kao osiguranje da kad se jednom alatka zaključena i kad se torzija povećana, neće biti dozvoljeno daljnje povećanje torzije do vrijednosti koja može premašiti graničnu vrijednost za spojnice koje se nalaze pri dnu niza. Rotacija je započeta sa 15 okr/min, a protok je povećan, dok se pažljivo pratila torzija da bi se zaustavila rotacija nakon što se postigne granična torzija. Tlak isplačne sisaljke je polako povećan do 12 617,405 kPa (1 830 psi) (protok od otprilike 0,0106-0,01325 m^3/s (168-210 gpm; 635,9-749,9 l/min)) kad

je uočen nagli porast torzije, dajući pozitivnu naznaku da je rotirajuća alatka aktivirana i da je sada u zaključanom, a ne u rotirajućem položaju (Okot et al., 2015).

Rotacija je zaustavljena, a niz alatki je stavljen pod nateg, prije nego što je zaostala torzija lagano otpuštena, kako bi se osiguralo da se nijedna spojnica nije odvrnula ili da se sustav za otpuštanje alatke za aktiviranje lajnera nije prerano aktivirao.

Nakon toga provedeno je kondicioniranje bušotine uz kretanje kolone gore-dolje bez rotacije, uz istovremenu cirkulaciju. Tijekom ove faze opterećenje na kuki je bilo 649,44 kN (146 klbs), otprilike 222,41 kN (50 klbs) manje od onoga prilikom rotacije s rotirajućom alatkom, naglašavajući opet prednosti u raspoloživom opterećenju zbog smanjenog trenja. Zatim je izvedena cementacija, a lajner je uspješno ugrađen. Kad je rotirajuća alatka izvučena iz kanala bušotine, potvrđeno je da je bila u zaključanom stanju (Okot et al., 2015).

7. ZAKLJUČAK

Današnje potrebe za većim količinama ugljikovodika natjerala je industriju da poveća proizvodnju, a time i da unaprijedi način eksploatacije ležišta nafte i plina. Izrada horizontalnih bušotina velikog dosega zahtjevnija je i izazovnija od izrade konvencionalnih bušotina zbog raznih problema koje se javljaju tijekom izrade ovakvih bušotine. Dosta problema se javljalo tijekom izrade horizontalnih bušotina velikog dosega među kojima su ugradnja kolone zaštitnih cijevi, osobito u horizontalnom dijelu kanala, trenje, ekvivalenta cirkulacijska gustoća isplake, torzija i nateg itd. Međutim napredak tehnologije i unapređenje opreme s vremenom su omogućili industriji da lakše rješavaju te probleme i da lakše pristupi rezervama koje je bilo nemoguće doseći konvencionalnim načinom bušenja.

Za uspjeh izrade horizontalnih bušotina velikog dosega potrebno je između ostalog detaljno planiranje što dovodi do jasnog i fleksibilnog dizajna bušotine, odabir odgovarajućeg bušaćeg postrojenja izgrađenog u tu svrhu i odgovarajuće opremljenog za izradu bušotina velikog dosega te odabir kvalitetne bušaće ekipe.

Prilikom izrade bušotine BD-04A u kataru 2008. godine postavljena su tad dva velika rekorda u naftnoj industriji i to su: bušotina BD-04A je najdulja ikad izbušena bušotina s 12 289,54 m (40 320 ft) mjerene duljine od vrtaćeg stola te s izrađenom najduljom horizontalnom sekcijom od 10 902,7 m (35 770 ft). Međutim u siječnju 2011. godine, 15 od 20 najduljih bušotina velikog dosega na svijetu bilo je izbušeno u okviru projekta Sakhalin 1 u Rusiji s tim da je bušotina Odoptu OP-11 nadmašila bušotinu BD-04A koju je kompanija Maersk Oil Qatar izbušila 2008. godine u Katru.

Inovativne alatke omogućile su napredak izrade horizontalnih bušotina velikog dosega, kao što je rotirajuća alatka kojom se smanjuje trenje i omogućava lakšu ugradnju lajnera kao što je to u slučaju izrade bušotine A u Saudijskoj Arabiji.

Izrada horizontalnih bušotina velikog dosega je poželjno izraditi u slučaju postajanja ležišta ispod naselja ili ležišta koja nije moguće doseći vertikalnim ili koso usmjerenim bušotinama, npr. izrada bušotina s kopna umjesto korištenja platformi radi financijske uštede. Većina horizontalnih bušotina izrađuju se zbog razrade raspucanih stijena u ležištu, ležišta s potencijalnim problemima konusiranja vode i/ili plina te ležišta s proizvodnim naslagama male debljine

8. LITERATURA

1. Bennetzen, B., Fuller, J., Isevcon, E., Krepp, T., Meehan, R., Mohammed, N., Poupeau, J-F., Sonowal, K. 2010. Oil filed review autumn 2010. Schlumburger, 22 (3), str. 4-15.
2. Directionaldrilling.wordpress.com. URL: https://directionaldrilling.files.wordpress.com/2012/03/horizontal-well.jpg **(**04.09.2015**.)**
3. El-Sayed, A-A.H., Khalaf, F., Ghzaly, S.M., GUPCO/Cairo U., 1991. Casing Design Considerations for Horizontal Wells, SPE 21386, SPE Middle East Oil Show, Bahrain, 16-19 November 1991., str. 421-428
4. Exxon Mobil. http://corporate.exxonmobil.com/en/engineering/extended-reach-technology/about/overview (15.05.2015.)
5. Gaurina-Međimurec, N. 2014, Usmjereno bušenje (Directional Drilling), materijali s predavanja (neobjavljeno).
6. Krištafor, Z. 2009, Projektiranje zacjevljenja, skripta, Zagreb
7. Matanović, D. 2014, Tehnika izrade bušotina, Ponašanje cijevi u različitim dijelovima kanala bušotine, materijali s predavanja (neobjavljeno).
8. Nguyen, J.-P.,1996. Drilling:Oil and Gas Field Development Techniques, Paris: Editions Technip, str. 276-282
9. Okot, M., Dubais, J., Al-Hajji, A., Chima, J., Deschamps, B., Elrefaei, I., 2015. Innovative Rotatable Friction Reduction Tool Applies Extra Force to Deploy Longest 7in. Liner in Saudi Arabia, SPE-172545-MS, SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, Manama, Bahrain, 8-11 March 2015., str 1-13
10. PetroWiki. 2015a. URL:http://petrowiki.org/Extended_reach_wells (08.05.2015.)
11. PetroWiki. 2015b. URL: http://petrowiki.org/Horizontal_wells (24.06.2015.)
12. Sonowal, k., Bennetzen, B., Wong, P., Isevcan, E., 2009. How Continuous Improvement Lead to the Longest Horizontal Well in the World, SPE/IADC 119506, SPE/IADC Drilling Conference and Exhibiton, Amsterdam, The Netherlands, 17-19 March 2009., str. 1-12
13. Steiner, I., Boškov Steiner, Z., 1994. Tehnologija vodoravnog bušenja. Zagreb, str1-3
14. Walker, M. W., 2012. Pushing the Extended Reach Envelope at Sakhalin: An Operator's Experience Drilling a Record Reach Well, IADC/SPE 151046,

IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, Sand Diego, California, USA, 6-8 March 2012., str. 1-11

IZJAVA

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

_____