Usmjereno bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi

Forko, David

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:169:587073

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**

Repository / Repozitorij:

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

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

USMJERENO BUŠENJE UZ PRIMJENU ZAŠTITNIH CIJEVI

Diplomski rad

David Forko
N-129

Zagreb, 2015

Sveučilište u Zagrebu Diplomski rad

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

USMJERENO BUŠENJE UZ PRIMJENU ZAŠTITNIH CIJEVI

DAVID FORKO

Diplomski rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zavod za naftno inženjerstvo

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

U diplomskom radu opisana je tehnologija izrade bušotina uz primjenu kolone zaštitnih cijevi. Prednost ove metode očituje se u smanjenju vremena potrebnog za izradu bušotine i smanjenje troškova bušenja. Za izradu kanala bušotine koriste se zaštitne cijevi koje će trajno biti ugrađene unutar kanala bušotine umjesto konvencionalnog niza alatki. Sklop alatki na dnu bušaćeg niza spušta se u bušotinu i izvlači iz nje opremom na žici kroz kolonu zaštitnih cijevi. Zanimanje za usmjereno bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi sve više raste uviđanjem prednosti ostvarenih u vertikalnim bušotinama. U diplomskom radu opisani su sustavi za izradu usmjerenih bušotina: upravljivi dubinski motor i upravljivi sustav te njihova primjena u praksi.

Ključne riječi: zaštitne cijevi, sklop alatki na dnu, usmjereno bušenje, upravljivi dubinski motor, upravljivi sustav

Diplomski rad sadrži: 60 stranica, 3 tablice, 23 slike i 5 literaturna navoda

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

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

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

Dr. sc. Nediljka Gaurina - Međimurec, redovita profesorica, RGNF-a

Dr. sc. Katarina Simon, redovita profesorica, RGNF-a

Datum obrane: 18.12.2015

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

DIRECTIONAL CASING DRILLING

DAVID FORKO

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

Master thesis illustrates technology of casing drilling. Advantage of this method is in reduction of time needed to drill well and increase of cost efficiency. This drilling technique uses the large-diameter tubulars that will be permanently installed in wellbore. Bottom hole assembly is runned into and out of well by wireline. Advantages demonstrated in vertical wells are also attractive for directional wells. Steerable downhole motors and rotary steerable systems are explained in theory and practice.

Keywords: casing, bottom hole assembly, directional drilling, steerable downhole motor, rotary steerable system

Thesis contains: 60 pages, 3 tables, 23 figures and 5 references

Original in: Croatian

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

Supervisor: PhD. Borivoje Pašić, Assistant Professor

Reviewers: PhD. Borivoje Pašić, Assistant Professor
PhD. Nediljka Gaurina - Međimurec, Full Professor
PhD. Katarina Simon, Full Professor

Date of thesis defense: 18.12.2015

Izjava

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

_____

David Forko

SADRŽAJ

POPIS TABLICA.....III

POPIS SLIKA.....IV

POPIS KORIŠTENIH KRATICA.....VI

1. UVOD.....1

2. BUŠENJE UZ PRIMJENU KOLONE ZAŠTITNIH CIJEVI.....2

2.1. Bušaće postrojenje.....4

2.1.1. Vršni pogon.....5

2.2. Kolona zaštitnih cijevi.....6

2.3. Sklop alatki na dnu.....7

2.3.1.Alatka za spuštanje i izvlačenje.....7

2.3.2. Proširivač.....7

2.4. Primjer iz prakse u južnom Texasu.....8

3. USMJERENO BUŠENJE UZ PRIMJENU KOLONE ZAŠTITNIH CIJEVI.....15

3.1. Proces usmjerenog bušenja uz primjenu kolone zaštitnih cijevi.....15

3.2. Izvlačivi sklop alatki na žici za usmjereno bušenje.....17

3.3. Testiranje sustava za usmjereno bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi.....20

3.3.1. Izrada usmjerene bušotine primjenom zaštitnih cijevi promjera 0,1778 m (7") 22

3.3.2. Izrada usmjerene bušotine primjenom zaštitnih cijevi promjera 0,3397 m (13 3/8").....23

3.3.3. Kontrola otklona.....24

3.4. Izrada usmjerenih bušotina pomoću zaštitnih cijevi i upravljivog dubinskog motora.....27

3.5. Izrada usmjerenih bušotina uz primjenu upravljivog sustava (engl. Rotary Steerable System - RSS) i niza zaštitnih cijevi.....34

3.5.1. Primjena upravljivog sustava.....36

4. PRIMJENA U PRAKSI.....42

4.1. Primjena novih tehnologija tijekom usmjerenog bušenja pomoću zaštitnih cijevi na polju Eldfisk 42

4.2. Planiranje projekta 44

4.3. Konstrukcija bušotine 44

4.4. Torzija i nateg tijekom usmjerenog bušenja pomoću zaštitnih cijevi 45

4.5. Dizajn zaštitnih cijevi 46

4.6. Odabir isplake i modeliranje hidrauličkih parametra 47

4.7. Odabir dlijeta 48

4.8. Sustav alatki na dnu i sustav za mjerenje tijekom bušenja 49

4.9. Kontrola tlaka u bušotini 51

4.10. Bušenje usmjerene bušotine pomoću zaštitnih cijevi promjera 0,273 m (10 ¾") 52

4.11. Bušenje usmjerene bušotine pomoću zaštitnih cijevi promjera 0,1968 m (7 ¾") 53

4.12. Analiza primijenjene tehnologije usmjerenog bušenja uz primjenu kolone zaštitnih cijevi na polju Eldfisk 55

5. ZAKLJUČAK 60

6. LITERATURA 61

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Rezultati terenskog testiranja nove opreme za usmjereno bušenje uz primjenu niza zaštitnih cijevi..... 21

Tablica 3-2. Test sa zaštitnim cijevima promjera 0,1778 m (7") 23

Tablica 4-1. Prikaz radova zaštitnim cijevima promjera 0,1968 m (7 ¾") 54

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Usporedba konvencionalnog bušenja i bušenja uz primjenu kolone zaštitnih cijevi.....3

Slika 2-2. Bušaće postrojenje za bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi 5

Slika 2-3. Vršni pogon.....6

Slika 2-4. Raspodjela neproduktivnog vremena tijekom bušenja na polju Lobo u 2000. i 2001. godini.....9

Slika 2-5 Izrada kanala bušotine promjera 0,225 m (8 7/8“) i ugradnja proizvodnog niza zaštitnih cijevi promjera 0,114 m (4 1/2“).....11

Slika 3-1. Sklop za zabravljivanje.....17

Slika 3-2. Odbravljivanje i izvlačenje dubinskog sklopa alatki.....19

Slika 3-3. Sklop za kontrolu otklona kanala.....25

Slika 3-4. Izvlačivi sklop.....27

Slika 3-5. Usporedba sustav za usmjeravanje alatki konvencionalnog niza bušaćih alatki i niza zaštitnih cijevi.....28

Slika 3-6. Sklop alatki na dnu s upravljivim motorom za povećanje kuta otklona.....31

Slika 3-7. Rotacijski sklop alatki na dnu za postizanje i održavanje vertikalnosti kanala bušotine.....33

Slika 3-8. Upravljivi sustav 35

Slika 3-9. „Papučice“ sustava za promjenu otklona kanala bušotine.....36

Slika 3-10. Sklop alatki na dnu sa RSS – sustavom za izradu vertikalne bušotine 38

Slika 3-11. Sklop alatki na dnu sa RSS – sustavom za izradu usmjerene bušotine.....40

Slika 4-1. Platforma Eldfisk Bravo 42

Slika 4-2. Dvostruka bušotinska glava.....43

Slika 4-3. Konstrukcija bušotine B-16A.....45

Slika 4-4. Tenaris Blue spojnica zaštitnih cijevi.....47

Slika 4-5. Korišteni sklop alatki na dnu za izradu usmjerene bušotine B-16A.....50

Slika 4-6. Rezni elementi proširivača nakon upotrebe tijekom bušenja dionice kanala bušotine B-16A 57

Slika 4-7. Ekvivalentna gustoća cirkulirajuće isplake 59

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

BHA (*engl. Bottom Hole Assembly*) – sklop alatki na dnu

MWD (*engl. Measurement While Drilling*) – sustav za mjerenje tijekom bušenja

PDC (*engl. Polycrystalline Diamond Compact*) – polikristalno dijamantsko bušaće dlijeto

RSS (*engl. Rotary Steerable Systems*) – upravljivi sustav

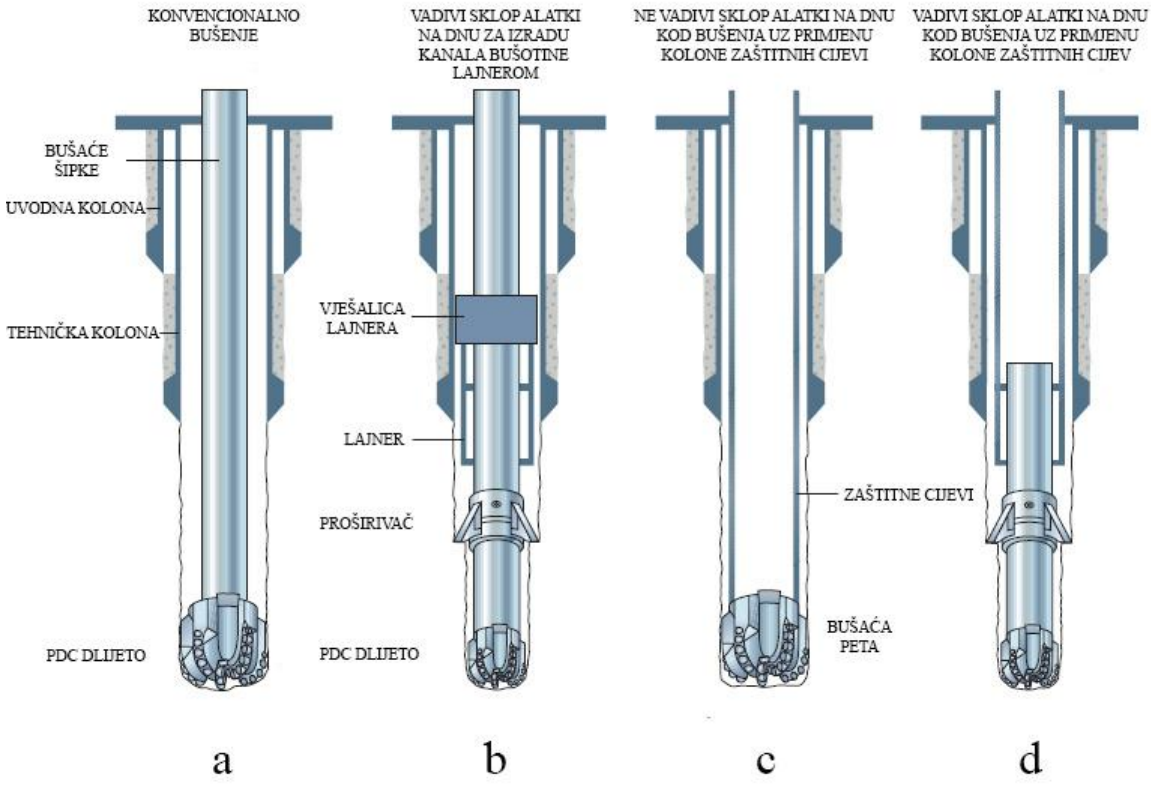
TMBSOBM (*engl. Treated Micronized Barite Slurry Oil Based Mud*) – isplaka na bazi ulja s usitnjenim baritom

1. UVOD

Tema ovog diplomskog rada je usmjereno bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi. Tehnologija bušenja uz primjenu kolone zaštitnih cijevi je dokazano učinkovita u smanjenju raznih problema koji se mogu pojaviti tijekom bušenja kao i samih troškova bušenja. Kako bi se bolje razumjela sama tehnologija izrade usmjerenog kanala bušotine pomoću niza zaštitnih cijevi dan je kratak prikaz izrade vertikalnih bušotina uz primjenu kolone zaštitnih cijevi. Najjednostavnija primjena odnosi se na niz zaštitnih cijevi s polikristalinskim dlijetom (*engl. Polycrystalline Diamond Compact - PDC*) za izradu vertikalne bušotine. Smanjenje troškova izrade bušotine, poboljšana efikasnost bušenja i smanjeni utjecaj bušaćih operacija na okoliš su prednosti uočene primjenom ove metode. Navedene prednosti povećale su interes kompanija za usmjereno bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi. Sklop za usmjereno bušenje pomoću zaštitnih cijevi ispitan je na više bušotina te je ova tehnologija danas u komercijalnoj primjeni. Ova tehnologija uspješno je primjenjena na poljima Sjevernog mora, Bliskog istoka, Ekvadora, južnog Texasa i Malajskog poluotoka. Tehnologiju izrade usmjerenih bušotina uz primjenu kolone zaštitnih cijevi koriste mnoge svjetske kompanije, naprimjer Tesco, Schlumberger i Weatherford. Rezultati dobiveni pokusnim bušenjem pokazali su mogućnost široke primjene od izrade bušotine na kopnu do primjene na odobalnim postrojenjima što je prikazano primjerom na polju Eldfisk.

2. BUŠENJE UZ PRIMJENU KOLONE ZAŠTITNIH CIJEVI

Tehnologija izrade bušotine uz primjenu kolone zaštitnih cijevi može smanjiti troškove izrade bušotine, poboljšati efikasnost bušenja i smanjiti utjecaj bušaćih operacija na okoliš. Za izradu kanala bušotine umjesto konvencionalnog niza alatki koriste se zaštitne cijevi koje će trajno biti ugrađene unutar kanala bušotine. Konvencionalno dlijeto ili posebna bušaća peta pričvršćeni na dno kolone zaštitnih cijevi mogu se upotrijebiti za izradu vertikalnih bušotina. Za dodatnu fleksibilnost i primjene koje zahtijevaju kontrolu otklona kanala bušotine koristi se sklop alatki na dnu (*engl. Bottom Hole Assembly - BHA*). Manipulacijom sklopa alatki na dnu uz pomoć opreme na žici eliminira se potreba za spuštanjem i izvlačenjem niza zaštitnih cijevi. Smanjenjem broja manevara smanjuje se i broj potencijalnih problema tijekom bušenja kao što su: klipovanje bušotine, nenamjerno skretanje kanala bušotine te smanjenje trošenja niza zaštitnih cijevi unutar prethodno ugrađenih zaštitnih cijevi. Nakon postizanja konačne dubine kanala bušotine zaštitne cijevi se nalaze na poziciji za cementaciju te nema potrebe za vađenjem bušaćih šipki i spuštanjem zaštitnih cijevi kao što je to slučaj kod konvencionalnog bušenja. Takvo smanjenje broja manevara bušaćim alatom povećava sigurnost cjelokupnog procesa izrade kanala bušotine te omogućava upotrebu postrojenja standardnih veličina ili manjih, specijalno izrađenih za bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi. Prednosti novih postrojenja su u tome što zahtijevaju manju snagu, troše manje goriva, zauzimaju manju površinu te se mogu brže i lakše premještati s lokacije na lokaciju. Prednosti tijekom bušaćih operacija odnose se na manje vremena potrebnog za cirkulaciju isplake i potrebe za proširivanjem kanala bušotine kako bi se održala stabilnost stijenki kanala bušotine tijekom spuštanja zaštitnih cijevi. Uz to što navedene prednosti povećavaju učinkovitost bušenja ujedino smanjuju ukupni trošak izrade bušotine te smanjuju utjecaj na okoliš. Upotreba zaštitnih cijevi za izradu kanala bušotine predstavlja temeljnu promjenu u procesu izrade kanala bušotine. Bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi omogućava jednaku učinkovitost pri izradi kanala bušotine kao i kod konvencionalnih alatki, ali uz bolje iznošenje krhotina i čišćenje dna bušotine. Na (slika 2-1) prikazana je usporedba konvencionalnog niza bušaćih alatki i različitih sklopova alata za izradu bušotine uz primjenu niza zaštitnih cijevi.



Slika 2-1. Usporedba konvencionalnog bušenja i bušenja uz primjenu kolone zaštitnih cijevi (Fontenot et al., 2005)

Konvencionalne bušaće operacije uključuju upotrebu žrvanjskog dlijeta ili dlijeta s fiksnim reznim elementima na dnu niza bušaćih alatki (slika 2-1. a). Kao alternativu konvencionalnom bušenju razvijeni su i testirani razni sustavi za bušenje uz primjenu lajnera i kolone zaštitnih cijevi. Bušenje s lajnerom sastoji se od lajnera i sklopa alatki na dnu kao donjeg dijela bušaćeg niza te bušaćih šipki kao gornjeg dijela bušaćeg niza (slika 2-1. b). Konvencionalni niz bušaćih alatki spojen je sa sklopom alatki na dnu do konačne dubine kanala bušotine i preuzima većinu opterećenja tijekom bušenja. Vješalica lajnera ili paker povezuje bušaći niz s lajnerom. Sklop alatki na dnu može se izvaditi iz bušotine samo nakon dovršetka kanala bušotine i odsjedanja lajnera. Ako dođe do zatajenja sklopa alatki na dnu, cijeli niz uključujući i lajner potrebno je izvaditi iz bušotine. Maksimalna dubina bušenja definirana je položajem vješalice lajnera na nizu bušaćih alatki. Kolona zaštitnih cijevi s nevadivim (slika 2-1. c) ili s vadivim sklopom alatki na dnu (slika 2-1. d) omogućava dodatnu fleksibilnost i funkcionalnost ovog sustava. Sklop alatki na dnu može se spuštati i vaditi iz bušotine: nizom bušaćih šipki manjeg promjera od unutarnjeg

promjera zaštitnih cijevi, savitljivim tubingom ili opremom na žici bez potrebe za vađenjem zaštitnih cijevi (Fontenot et al., 2005).

Osnovni elementi sustava za izradu kanala bušotine uz primjenu kolone zaštitnih cijevi su:

- bušaće postrojenje,
- kolona zaštitnih cijevi,
- sklop alatki na dnu.

2.1. Bušaće postrojenje

Postrojenje (slika 2-2.) potrebno za bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi je slično onome kod konvencionalnog bušenja. Također, konvencionalna postrojenja mogu biti preuređena za bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi. Preuređenje zahtijeva zamjenu ili dodavanje nekoliko ključnih komponenti sustava, a to su:

- ugradnja dizalice i odabir bušaćeg užeta dovoljnog kapaciteta za manevriranje nizom zaštitnih cijevi i alatki na dnu;
- ugradnja vršnog pogona;
- ugradnja sklopa preventera i sklopa za brtvljenje oko bušaćeg užeta;
- ugradnja sustava za manipulaciju zaštitnim cijevima.

Slika 2-2. Bušaće postrojenje za bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi (Fontenot et al., 2005)

2.1.1. Vršni pogon

Upotreba vršnog pogona omogućuje rotiranje bušaćeg niza sastavljenog od zaštitnih cijevi, te njihovo vertikalno kretanje uz istovremeno protiskivanje isplake. Te mogućnosti značajno su poboljšale učinkovitost bušenja općenito.

Vršni pogon (slika 2-3.) sastoji se od:

- motora i isplačne glave,
- vodilice,
- sklopa za odvrtanje i navrtanje,
- kontrolno-upravljačkog sustava.

Slika 2-3. Vršni pogon (Bizerch., 2015)

Sklop za hvatanje zaštitnih cijevi koji se nalazi ispod vršnog pogona služi za povezivanje niza zaštitnih cijevi s vršnim pogonom, prijenos torzije na niz zaštitnih cijevi i provođenje isplake u zaštitne cijevi.

2.2. Kolona zaštitnih cijevi

Tehnologija bušenja uz primjenu kolone zaštitnih cijevi koristi standardne zaštitne cijevi za bušenje i zacjevljivanje kanala bušotine istovremeno. Zaštitne cijevi omogućuju prijenos hidrauličke i mehaničke energije s površine do izvlačvog bušaćeg sklopa koji je odsjednut u profiliranoj spojnici lociranoj blizu dna kolone zaštitnih cijevi. Cirkulacija isplake odvija

se kroz zaštitne cijevi do dna, te kroz prstenasti prostor između zaštitnih cijevi i stijenki kanala bušotine. Zaštitne cijevi i spojnice su pri izradi kanala bušotine opterećene torzijskim i tlačnim naprezanjima za razliku od konvencionalnog zacjevljivanja kanala bušotine gdje su zaštitne cijevi uglavnom opterećene vlačno (Šolić, 2005).

2.3. Sklop alatki na dnu

Sklop alatki na dnu bušaćeg niza spušta se u bušotinu i izvlači iz nje kroz kolonu zaštitnih cijevi opremom na žici ili pomoću bušaćih šipki. On je zabravljen pomoću spojnice na dnu niza zaštitnih cijevi. Sklop alatki na dnu sastoji se od (Šolić., 2005):

- alatke za spuštanje i izvlačenje,
- sklopa za zabravljivanje,
- uronjenog motor (dodaje se prema potrebi),
- proširivača,
- dlijeta.

2.3.1.Alatka za spuštanje i izvlačenje

Alatka za spuštanje i izvlačenje sklopa alatki na dnu sastoji se od žice i elementa koji hvata vrh BHA-a unutar zaštitnih cijevi. Brzine spuštanja i izvlačenja sklopa alatki na dnu ovise o: dubini, vlačnoj sili i tlaku cirkulacije a kreću se od 60 do 120 m/min (Šolić, 2005).

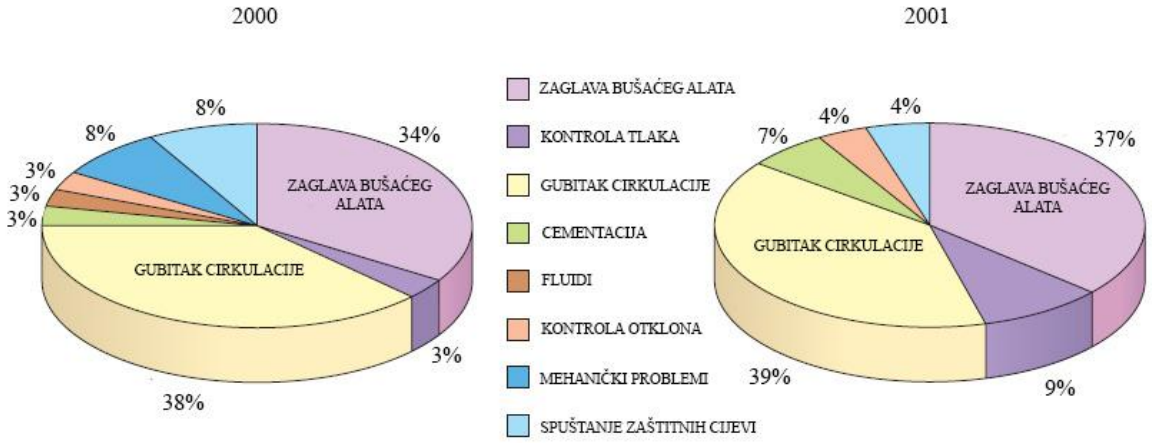
2.3.2. Proširivač

Proširivač je jedan od glavnih dijelova niza bušaćih alatki sastavljenih od zaštitnih cijevi. Koristi se kako bi postigao konačni promjer kanala bušotine. U početcima razvoja ove tehnologije bilo je slučajeva u praksi da se ramena proširivača nisu mogla deaktivirati i nije bilo moguće izvući sklop za bušenje. Vrlo bitan dio odnosi se na mogućnost tijela proširivača da u sebi sadrži PDC „ruke“ s reznim elementima i mogućnost zamjene

prednjeg i stražnjeg prijelaznog komada na krajevima proširivača čime je riješen problem aktiviranja i deaktiviranja riješen te se takvo tehničko rješenje pokazalo pouzdanim u praksi. Proširivač se može upotrijebiti u kombinacijama s tipovima „ruku“ koje mogu imati različite rezne elemente. Time se postiže efikasnije proširivanje kanala bušotine u stijenama različitog litološkog sastava. Veličina i smještaj reznih elemenata ovisi o vrsti formacije u kojima će se primjenjivati te o željenom promjeru kanala bušotine (Šolić, 2005).

2.4. Primjer iz prakse u južnom Texasu

Kompanija ConocoPhillips pokrenula je 1997. godine projekt izrade dodatnih bušotina na polju Lobo između postojećih bušotina u skladu s planiranim rasporedom bušotina na polju, kako bi se smanjio razmak između bušotina odnosno povećala gustoća mreže bušotina i tako povećala proizvodnja i mogući konačni iscrpak. Od 1997. godine kompanija ConocoPhillips izradila je oko 900 bušotina na polju Lobo s rasponom dubina od 2286 m do 3962 m, kako bi se iscrpile dodatne rezerve plina na tom području. Većina tih bušotina izrađena je konvencionalnim nizom alatki i PDC dlijetom. Unatoč velikom iskustvu na ovom području, vrijeme prekida rada postrojenja predstavljalo je manje od 10% ukupnog vremena potrebnog za izradu bušotine, te se javila potreba za novim pristupom izradi bušotina kako bi se smanjili troškovi. Godine 2001. kompanija ConocoPhillips započela je s analizom prakse izrade bušotina na polju Lobo kako bi se povećala efikasnost bušenja i čime bi se učinila isplativom eksploatacija manjih ležišta na polju Lobo koja sadrže rezerve plina manje od 28300000 m^3 ($10x10^8$ ft^3). Iako je bušenje pojedinih dionica kanala bušotine moguće obaviti konvencionalnim alatkama, problemi prilikom izrade kanala bušotine i vrijeme prekida rada postrojena pri konačnoj dubini svake sekcije utjecali su na učinkovitost primjene tehnologije bušenja. Gubitak cirkulacije, diferencijalni prihvat alatki i nemogućnost ugradnje zaštitnih cijevi do konačne dubine pojedine dionice kanala bušotine predstavljaju 75% od ukupnih problemi pri izradi bušotina na polju Lobo tijekom 2000. godine i 2001. godine (slika 2-4).



Slika 2-4. Raspodjela neproduktivnog vremena tijekom bušenja na polju Lobo u 2000. i 2001. godini (Fontenot et al., 2005)

Tijekom izrade kanala bušotine konvencionalnim alatkama često je bilo potrebno dodatno cirkuliranje isplake u bušotini, kako bi se riješili problemi vezani uz gubitak cirkulacije i urušavanje kanala bušotine u zonama smanjenog tlaka. Dodatne poteškoće predstavljao je i dotok plina kod bušenja tehničke kolone zaštitnih cijevi ili proizvodnih zona, te diferencijalni prihvat alatki ili zaštitnih cijevi, što je rezultiralo problemima vezanim uz kontrolu tlaka u bušotini. Kompanija ConocoPhillips odlučila se za primjenu tehnologije izrade kanala bušotine uz primjenu kolone zaštitnih cijevi kao potencijalnog rješenja za navedene probleme i poboljšanje učinkovitosti bušenja. Mnogi problemi vezani uz kontrolu tlaka i dotok slojnog fluida dogodili su se tijekom manevriranja nizom bušaćih alatki. Bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi umanjuje ili u potpunosti eliminira potrebu za manevrom niza bušaćih alatki zbog toga što zaštitne cijevi ostaju na dnu kanala bušotine u najboljoj poziciji u slučaju pojave dotoka slojnog fluida. Ovo predstavlja značajnu prednost tijekom bušenja u zonama s povećanim slojnim tlakom. Prva faza procjene mogućnosti bušenja uz primjenu kolone zaštitnih cijevi obuhvaćala je izradu pet bušotina. Kompanija ConocoPhillips proširila je testnu fazu kako bi se odredilo da li bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi može konkurirati konvencionalnom bušenju na polju Lobo. U drugoj fazi dokazano je da bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi u

odnosu na konvencionalno bušenje, smanjuje vrijeme prekida rada postrojenja povezano s već ranije spomenutim problemima. Vrijeme prekida rada postrojenja na sljedećih jedanaest bušotina izrađenih uz primjenu kolone zaštitnih cijevi primarno je povezano s mehaničkim i operativnim problemima, odnosno nije zabilježen ni jedan problem vezan uz gubitak cirkulacije ili prihvat alatki. Tijekom prve dvije faze ovog projekta, učinkovitost „Tesco Casing Drilling„ sustava sustavno se poboljšavala, a prosječna dnevna brzina bušenja konvencionalnim alatkama dostignuta je već na petoj bušotini, a na kraju je i premašena. Kanal bušotine za polaganje uvodne kolone zaštitnih cijevi na polju Lobo izrađen je sljedećim sastavom alata:

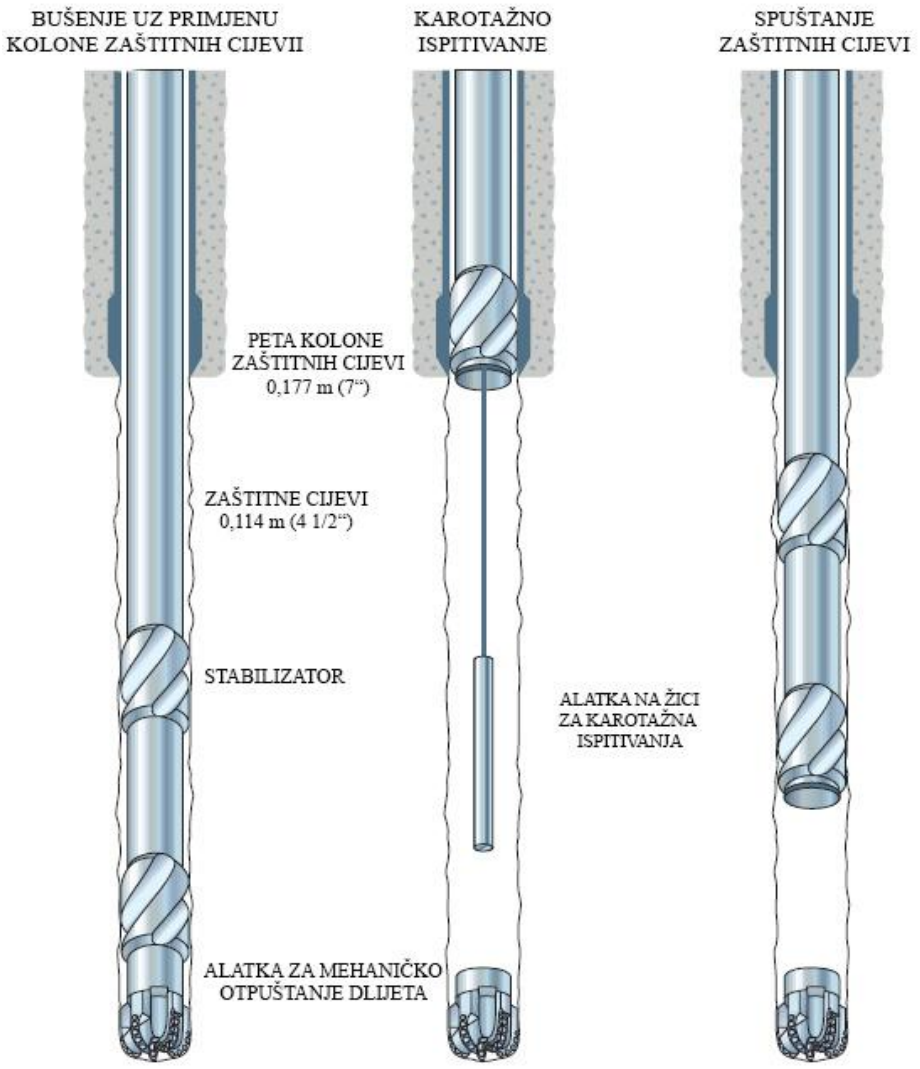
- zaštitnim cijevima promjera 0,244 m (9 5/8“);
- vadivim sklopom alatki na dnu;
- proširivačem promjera 0,311 m (12 1/4“);
- PDC dlijetom promjera 0,215 m (8 1/2“).

Kompanija ConocoPhillips izradila je kanal bušotine za uvodnu kolonu na svim bušotinama uz samo jedan manevar alatkama. Tom prilikom uočeno je nekoliko problema pri vađenju sklopa alatki na dnu uz pomoć opreme na žici. Vremena samog bušenja bila su nešto veća od onih kod primjene konvencionalnog niza bušaćih alatki. Unatoč tome uvodne dionice kanala bušotine duljine 152 m su u potpunosti izbušene, zacjevljene i cementirane u približno istom vremenu kao one izrađene konvencionalnim nizom bušaćih alatki. Cementni kamen unutar prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi promjera 0,244 m (9 5/8“) izbušen je sljedećim sastavom alata:

- zaštitnim cijevima promjera 0,177 m (7“);
- proširivačem promjera 0,215 m (8 1/2“);
- PDC dlijetom promjera 0,158 m (6 1/4“).

Nakon bušenja cementnog kamena i nekoliko metara formacije ispod pete prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi, sklop alatki na dnu izvađen je opremom na žici na površinu te je zamijenjen drugim za izradu kanala bušotine promjera 0,225 m (8 7/8“). U prvotno izrađivanim bušotinama ovaj sastav alatki na dnu korišten je za bušenje kanala do dubine od 1981 m na kojoj formacije postaju tvrđe. Nakon dosezanja 1981 m alat je zamijenjen novim u skladu s promjenom litologije, s kojim se bušilo do konačne planirane dubine za ugradnju zaštitnih cijevi promjera 0,177 m (7“). Kako se sve više stjecalo

iskustvo bušenja s kolonom zaštitnih cijevi ConocoPhillips započeo je izrađivati kanal bušotine za tehničku kolonu jednim sastavom alatki. Proizvodna dionica kanala bušotine, prvotno je izrađivana konvencionalnim sastavom alatki sve dok se nije razvio postupak bušenja pomoću zaštitnih cijevima promjera 0,114 m (4 1/2“). Proizvodna dionica kanala bušotine kasnije izrađivanih bušotina, bušena je PDC dlijetom promjera 0,158 m (6 1/4“) pričvršćenim na dno zaštitnih cijevi alatkom za mehaničko otpuštanje. Ta alatka također je služila kao stabilizator neposredno iznad dlijeta, prijelazni komad između zaštitnih cijevi i dlijeta te kao proširivač nakon otpuštanja dlijeta (slika 2-5).



Slika 2-5. Izrada kanala bušotine promjera 0,225 m (8 7/8“) i ugradnja proizvodnog niza zaštitnih cijevi promjera 0,114 m (4 1/2“) (Fontenot et al., 2005)

Nakon postizanja konačne dubine kanala bušotine, u bušotinama gdje su planirana karotažna ispitivanja dlijeto je otpušteno s dna zaštitnih cijevi ubacivanjem „kuglice“. Zaštitne cijevi promjera 0,114 m (4 1/2“) zadignute su unutar zaštitnih cijevi promjera 0,177 m (7“) kako bi se omogućila karotažna ispitivanja. Nakon karotažnih ispitivanja cementacijski protupovratni ventil postavljen je na dno zaštitnih cijevi. Takav ventil omogućava protiskivanje cementne kaše u prstenasti prostor i sprječava njen povratak unutar zaštitnih cijevi. Zaštitne cijevi spuštene su na konačnu dubinu i cementirane. Kod bušotina u kojima nije bilo potrebno provesti karotažna ispitivanja cementacijski protupovratni ventil postavljen je na dno zaštitnih cijevi kako bi se omogućila cementacija kroz dlijeto. U početku primjene zaštitnih cijevi kao bušaćeg niza korištene su zaštitne cijevi s trapeznim navojnim spojem prilikom bušenja kanala bušotine za uvodnu i tehničku kolonu. Posebni prsten postavljeni na svaki spoj zaštitnih cijevi smanjuje torziju i povećavaju kapacitet torzije samog spoja. Tvrtka Grant Prideco razvila je novi tip spojnice koji je korišten prvotno sa zaštitnim cijevima promjera 0,114 m (4 1/2“), dok danas kompanija ConocoPhillips upotrebljava takve spojeve i na zaštitnim cijevima promjera 0,177 m (7“) za izradu kanala bušotine za tehničke kolone. Bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi uspješno je smanjilo probleme vezane uz prihvat alatki i gubitak optoka isplake. Sklop alatki na dnu bio je veoma pouzdan tijekom izvlačenja i ponovnog spuštanja na dubinama od 2743 m. Pravilnim sastavom alatki na dnu eliminirani su potencijalni problemi vezani uz kontrolu otklona kanala bušotine. Usporedbom dviju susjednih bušotina na polju Lobo pokazale su prednosti bušenja uz primjenu kolone zaštitnih cijevi. Bušotine su izbušene u razmaku od sedam mjeseci. Prva bušotina izrađena je konvencionalnim postrojenjem koje je na polju Lobo korišteno za bušenje preko četiri godine. Druga bušotina izrađena je uz primjenu kolone zaštitnih cijevi i bila je do tada najbrže izrađena bušotina primjenom ove tehnologije. Isključujući vrijeme potrebno za razne popravke bušaćeg postrojenja na obije bušotine, konvencionalnim načinom bušenja bilo je potrebno 300 sati za izradu kanala bušotine dok je uz primjenu kolone zaštitnih cijevi bilo potrebno 247,5 sati, što predstavlja uštedu od 17,5%. Brzina bušenja s konvencionalnim alatka bila je nešto veća od upotrebe kolone zaštitnih cijevi. Međutim kod izrade kanala bušotine uz primjenu klone zaštitnih cijevi zabilježeni su neznatni gubitci optoka isplake, a bušenje se nastavilo nakon saniranja istog. Ukupno vrijeme prekida rada postrojenja uzrokovano gubitcima cirkulacije bilo je manje od sat vremena. Suprotno tome kod bušotine izrađene konvencionalnim načinom zabilježena su četiri

gubitka optoka isplake u intervalu od 1981 m do 2895 m koja su zahtijevala dodatna 53 sata za njihovo rješavanje. Bušaće operacije s kolonom zaštitnih cijevi tijekom bušenja dionice kanala bušotine za ugradnju tehničke i proizvodne kolone zaštitnih cijevi uključivale su 66 sati neproduktivnog vremena, dok je kod konvencionalnog postrojenja to vrijeme iznosilo 113,5 sati. Brzina bušenja povećavala se s vremenom odnosno kako se stjecalo sve više iskustva te je potrebno vrijeme za bušenje smanjeno. Provode se testovi čiji je cilj bolje razumijevanje smanjenja napredka dlijeta tijekom bušenja uz primjenu kolone zaštitnih cijevi, čije bi saznanja također trebala pomoći u povećanju napretka dlijeta pri izradi budućih bušotina. Primjenom novih rješenja za prethodno navedena dva problema, moglo bi se smanjiti ukupno vrijeme potrebno za izradu bušotine dubine 2895 m na otprilike 200 sati što predstavlja smanjenje od 33% u odnosu na prethodnih 300 sati potrebnih za konvencionalno bušenje. U trećoj fazi ovog projekta, ConocoPhillips je mobilizirao tri nova „Tesco Casing Drilling“ bušaća postrojenja izrađena posebno za bušenje na polju Lobo. Nova postrojenja sadržavala su vršni pogon za manipulaciju zaštitnim cijevima kao i automatski sustav za uvlačenje zaštitnih cijevi u toranj (*engl. Catwalk)*. Nova postrojenja su zahtijevala manje goriva za rad i manje površine za smještanje postrojenja. Takva postrojenja imaju mogućnost bušenja do dubine od 4572 m i dizajnirana su za optimalno bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi, no također mogu raditi i s konvencionalnim alatkama. Tijekom pet godina kompanija ConocoPhillips izbušio je više od 350 dionica kanala bušotine odnosno oko 320 040 m u 110 bušotina, uz primjenu vadivog alata na žici te kolone zaštitnih cijevi. Iskustvo pri izradi tih bušotina pokazalo je da primjena kolone zaštitnih cijevi može smanjiti ili u potpunosti eliminirati probleme s gubitkom cirkulacije i ostale probleme povezane s iscrpljenim zonama na polju Lobo. U početku se očekivao gubitak optoka zbog povećane ekvivalentne cirkulacijske gustoće. Povećana vrijednost ekvivalentne cirkulacijske gustoće isplake proizlazi iz malog zazora između stijenke kanala bušotine i stijenke zaštitnih cijevi, što povećava gubitak tlaka uslijed trenja. Mehanizam pomoću kojeg bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi smanjuje probleme vezane uz gubitak optoka isplake trenutno nije potpuno jasan. Veće vrijednosti ekvivalentne cirkulacijske gustoće isplake omogućava korištenje isplake manje gustoće, što omogućava bušenje uz ispuhivanjem zrakom ili bušenje u uvjetima podtlaka. Tijekom sve tri faze ovog projekta na polju Lobo i tijekom drugih primjena tehnologije bušenja uz primjenu niza zaštitnih cijevi nije zabilježen slučaj ozbiljnijih gubitaka cirkulacije. Ovaj projekt potvrdio je pouzdanost vadivog sklopa alatki na dnu i nagovijestio

potencijalne buduće primjene bušenja uz primjenu kolone zaštitnih cijevi. Sve više kompanija primjenjuje ovu tehnologiju u područjima gdje konvencionalno bušenje rezultira značajno većim troškovima (Fontenot et al, 2005).

3. USMJERENO BUŠENJE UZ PRIMJENU KOLONE ZAŠTITNIH CIJEVI

Bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi pokazalo je određene prednosti u odnosu na konvencionalni način bušenja, a to su (Warren et al., 2003):

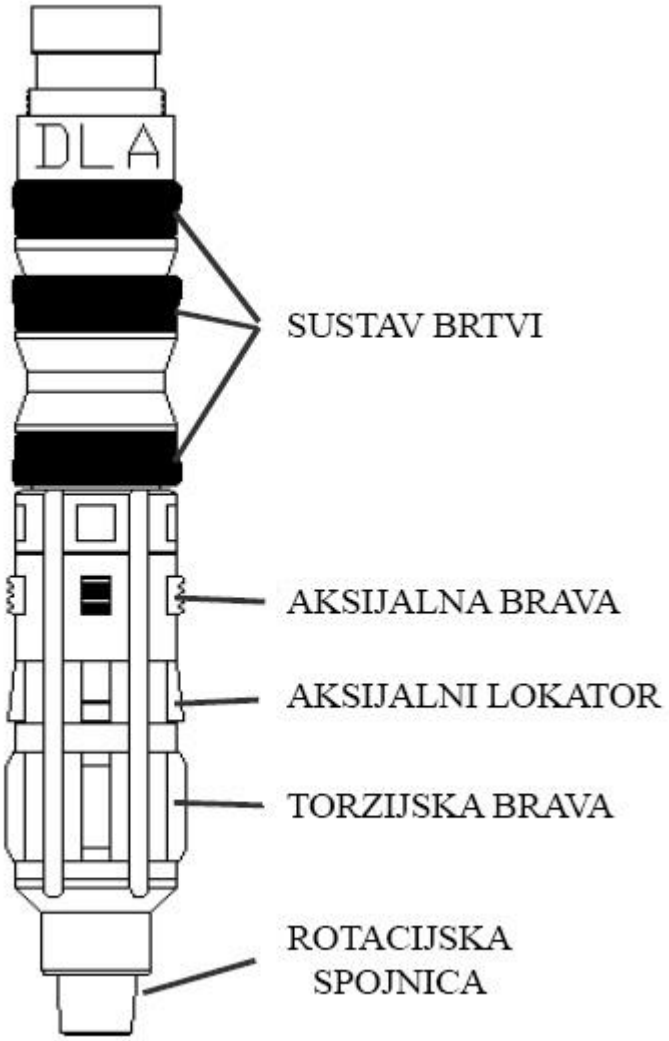
- značajno smanjenje vremena potrebnog za bušenje određene dionice kanala bušotine i postavljanja zaštitnih cijevi;
- smanjenje broja sekcija različitih promjera zaštitnih cijevi u pojedinim bušotinama;
- eliminiranje poteškoća pri vađenju bušaćeg alata i ugradnji zaštitnih cijevi;
- smanjenje potencijalnog gubitak fluida u proizvodne zone, što smanjuje oštećenje proizvodne zone i povećava proizvodnost;
- smanjenje ili potpuno otklanjanje problema vezanih uz kontrolu tlaka u bušotini i gubitak cirkulacije.

Većina do danas izrađenih bušotina uz primjenu kolone zaštitnih cijevi odnosi se na vertikalne bušotine, no zanimanje za usmjereno bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi sve više raste uviđanjem prednosti ostvarenih u vertikalnim bušotinama. Usmjereno bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi zahtijeva korištenje izvlačivog sklopa alatki kojim se manevrira pomoću alatki na žici. Izvlačivi sklop alatki za usmjereno bušenje koji je pozicioniran na donjem kraju niza zaštitnih cijevi, zamjenjuje alatke za usmjereno bušenje koje se koriste u konvencionalnom nizu bušaćih alatki. Takav sklop koji je uspješno upotrebljen sa zaštitnim cijevima promjera od 0,1778 m (7") do 0,3397 (13 3/8"), može biti izvučen i ponovo spušten kod otklona kanala bušotine koji premašuje 90° uz konstantnu cirkulaciju kako ne bi došlo do zaglave zaštitnih cijevi.

3.1. Proces usmjerenog bušenja uz primjenu kolone zaštitnih cijevi

Sustav za usmjereno bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi sastoji se od površinske opreme i niza zaštitnih cijevi opremljenog posebnom opremom, kako bi se usmjerenu bušotinu istovremeno bušilo i zacijevljivalo. Izvlačivi sklop alatki na žici učvršćen je u

profiliranoj spojnici blizu dna kolone zaštitnih cijevi. Niz zaštitnih cijevi spaja se pomoću sklopa za spajanje (*engl. Casing Drive System*) na vršni pogon te se rotira istim tijekom svih operacije osim kod usmjerenog bušenja uronjenim motorom. Pojedinačna zaštitna cijev uvlači se kroz otvor vrata bušaćeg tornja uz pomoć hidraulički upravljanog elevatora. Sklop za spajanje ima klizni mehanizam (*engl. Slip Assembly*) kojim hvata unutrašnjost zaštitne cijevi velikog promjera ili vanjski dio zaštitne cijevi malog promjera bez spajanja na gornju spojnicu zaštitne cijevi. Unutrašnji dio sklopa „trn“ osigurava hermetičnost između sklopa za spajanje i zaštitne cijevi. Vršni pogon i sklop za spajanje koriste se za međusobno spajanje zaštitnih cijevi te omogućuju spajanje zaštitnih cijevi jednako brzo kao i bušaćih šipki čime se smanjuje aktivnosti i povećava sigurnost na podištu tornja. Sklop alatki na dnu za usmjereno bušenje uključuje pilot-dlijeto iznad kojeg se nalazi proširivač. Namjena proširivača je ostvarivanje konačnog promjera kanala bušotine dok je pilot-dlijeto dimenzionirano kako bi prošlo kroz niz zaštitnih cijevi. Za vertikalno bušenje stabilizatori su postavljeni između pilot-dlijeta i proširivača. Za usmjereno bušenje u sklopu alatki na dnu nalaze se dodatno upravljivi dubinski motor (*engl. Steerable Downhole Motor*) i/ili upravljivi sustav (*engl. Rotary Steerable System*), sklop za mjerenje tijekom bušenja (*eng. Measurments While Drilling - MWD*) i nemagnetske teške šipke. Sklop za bušenje (*engl. Drilling Assembly*) spojen je na dno niza zaštitnih cijevi pomoću sklopa za zabravljivanje (*engl. Drill Lock Assembly*) (slika 3-1). Sklop za zabravljivanje omogućuje spajanje konvencionalnih bušaćih alatki na zaštitne cijevi i s opremom za spuštanje alatki u kolonu zaštitnih cijevi i izvlačenje iz nje. Fluid za ispiranje kanala bušotine protječe kroz kolonu zaštitnih cijevi do dna, kroz dlijeto te u povratnom toku kroz prstenasti prostor između zaštitnih cijevi i stijenki kanala bušotine.



Slika 3-1. Sklop za zabravljivanje (Šolić., 2005)

3.2. Izvlačivi sklop alatki na žici za usmjereno bušenje

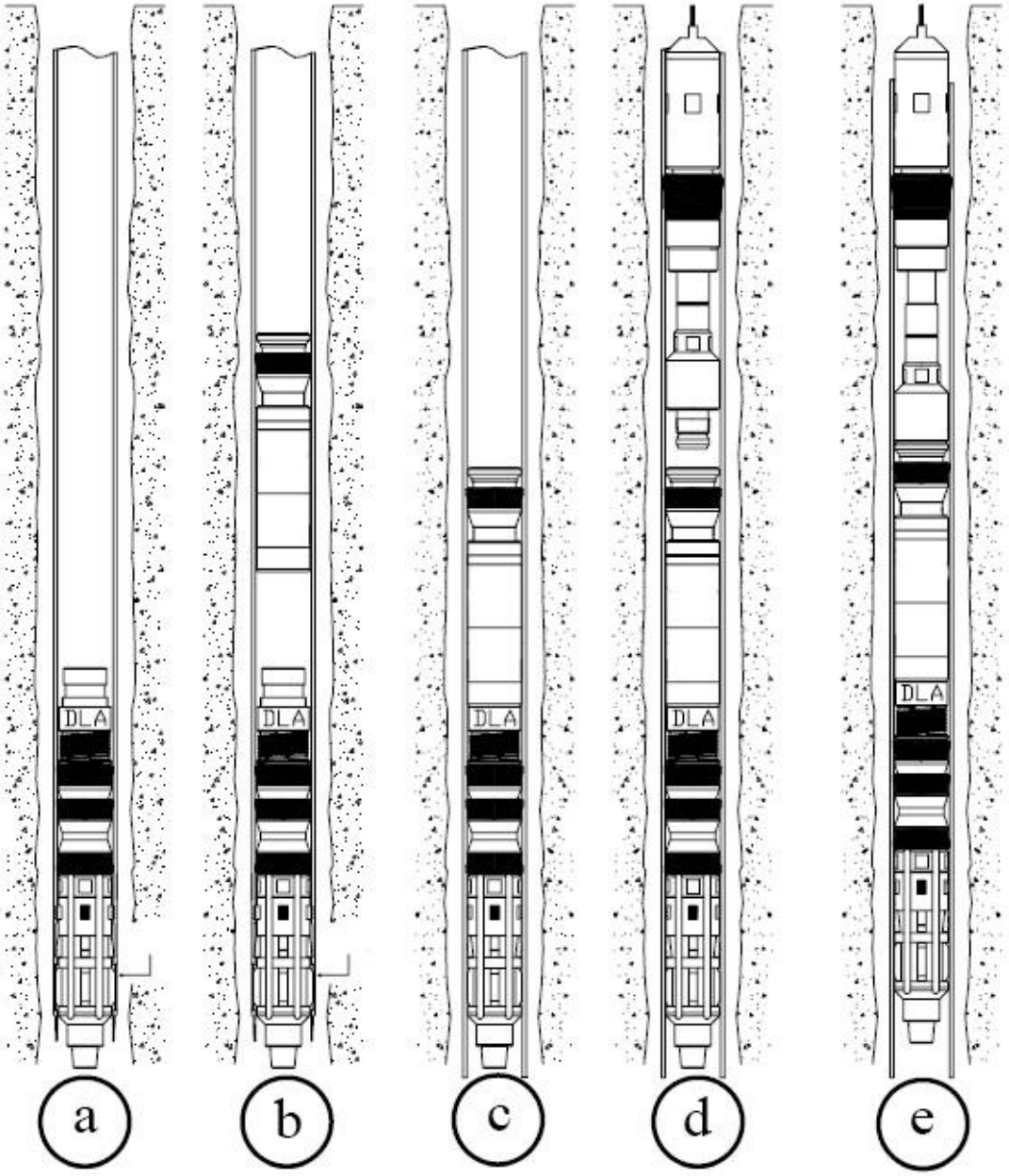
Vertikalne bušotine mogu biti izrađene uz primjenu kolone zaštitnih cijevi koristeći jednostavan sustav zaštitnih cijevi i dlijeta koje se nalazi na dnu zaštitnih cijevi. Kada se javi potreba za bušenjem bez rotacije zaštitnih cijevi ili određenu sekciju nije moguće izraditi primjenom samo jednog dlijeta, koristi se izvlačivi sklop alatki na žici. Kod usmjerenih bušotina je potreban izvlačivi sklop alatki na žici kako bi se prvenstveno moglo izvaditi skupu opremu za usmjereno bušenje, zbog potrebe za zamjenom određenog dijela sklopa ili povratka cjelokupne opreme za usmjereno bušenje prije cementacije. Osnovna

zamisao pri upotrebi niza zaštitnih cijevi za bušenje je brža manipulacija zaštitnim cijevima od manipulacije konvencionalnim alatkama, zbog toga što zaštitne cijevi imaju veću duljinu od bušaćih šipki, što znači da se tijekom procesa izarde bušotine ostvari 25% manje spajanja. Kako je u svijetu sveprisutan trend izrade usmjerenih bušotina razvijena je nova generacija opreme koja omogućava izradu usmjerenih bušotina pomoću niza zaštitnih cijevi. Nove alatke također imaju sposobnost aksijalnog i torzijskog zabravljivanja unutar zaštitnih cijevi, kako bi se fluid mogao usmjeriti do dlijeta, lociranja sklopa za zabravljivanje bez oslanjanja na mjerenja opremom na žici. Nove alatke za usmjereno bušenje imaju mogućnost manipulacije u usmjerenim bušotinama s kutom otklona većim od 90°, oslobađanje sklopa za zabravljivanje prije spuštanja opreme na žici, povećanu snagu aksijalnog i torzijskog mehanizma zabravljivanja, veći prostor za skretanje isplake kod protjecanja isplake mimo alatki i smještanje većine složenih alatki u vadivi dio radije nego u sklop za bravljenje koji je izložen djelovanju različitih sila tijekom bušenja te vibracijama.

Postupak izvlačenja alatki nakon bušenja sklopom za usmjereno bušenje: (Warren et al., 2003; Šolić., 2005)

1. Prije procesa izvlačenja sklop za zabravljivanje se nalazi na kraju niza zaštitnih cijevi (sklop alatki na dnu ispod sklopa za bravljenje nije prikazan), a peta kolone obično se nalazi 25 – 40 m (80 – 120 ft) iznad proširivača (slika 3-2 a);
2. Nakon toga kroz kolonu zaštitnih cijevi pomoću tlaka isplake potiskuje se „aktivator“ te se vrše pripreme za spuštanje opreme na žici (slika 3-2 b);
3. U trenutku kada „aktivator“ nasjedne na sklop za zabravljivanje, povećava se tlak, do tlaka otpuštanja sklopa iz profilirane spojnice. Čim dođe do oslobađanja sklopa za zabravljivanje, zadiže se niz zaštitnih cijevi za jednu ili dvije zaštitne cijevi i zaštitne cijevi se ispiru iznad sklopa alatki na dnu. Taj postupak osigurava da je sklop za zabravljivanje oslobođen prije spuštanja opreme na žici (slika 3-2 c);
4. Nakon oslobađanja alatki spušta se alatka za izvlačenje na žici kako bi se izvukao sklop alatki na dnu. Kod bušotina s velikim kutom otklona, alatka za izvlačenje se pumpama potiskuje i za sobom povlači žicu u bušotinu (slika 3-2 d);

5. U petom koraku dolazi do izvlačenja sklopa alatki na dnu i sklopa za zabravljivanje (slika 3-2 e).



Slika 3-2. Odbravljivanje i izvlačenje dubinskog sklopa alatki (Warren et al., 2003)

Sustav za izvlačenje alatki pomoću opreme na žici može biti korišten s promjerima zaštitnih cijevi 0,3397 m (13 3/8") i manjim, dok je spuštanje i izvlačenje uz primjenu bušaćih šipki također moguće. Sklop za zabravljivanje ima relativno velik unutarnji promjer npr. (0,069 m (2 3/4"), za 0,177 m (7") zaštitne cijevi) kako bi se smanjili gubitci tlaka i omogućili radovi na žici vezani uz sklop alatki na dnu. Kao što je već ranije rečeno

sklop alatki za usmjereno bušenje sastoji se od pilot-dlijeta, proširivača, upravljivog dubinskog motora ili upravljivog sustava, sklopa za mjerenje tijekom bušenja i nemagnetskih teških šipki. Sličan sustav alatki koristi se i za konvencionalno usmjereno bušenje, s tim što je dubinski motor manjih dimenzija od onog kod konvencionalnog bušenja za isti promjer kanala bušotine. Magnetski sustav za mjerenje tijekom bušenja koristi se za usmjeravanje bušaćih alatki, a zahtjeva sekciju nemagnetskih teških šipki između dlijeta i pete kolone. Time se povećava udaljenost pilot-dlijeta i proširivača za 25 – 40 m (80-120 ft) ispod pete kolone zaštitnih cijevi. Dubinski motor manjih dimenzija potreban za određene promjere zaštitnih cijevi ima limitiranu snagu, što nije slučaj kod zaštitnih cijevi promjera većih od 0,1778 m (7"). Najveća razlika između usmjerenog bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi i konvencionalnog usmjerenog bušenja jest da je savijanje sklopa s motorom ograničeno činjenicom da motor mora proći kroz zaštitne cijevi. Zazor između motora i unutarnjeg promjera zaštitnih cijevi je manji nego kod otvorenog kanala bušotine (Warren et al., 2003; Šolić., 2005).

3.3. Testiranje sustava za usmjereno bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi

Nakon teoretskih razmatranja provedena su i ispitivanja u bušotinama kako bi se: (Warren et al., 2003)

- dokazala mogućnost primjene usmjerenog bušenja pomoću niza zaštitnih cijevi;
- ispitala ograničenja primjene ovakvog načina izrade usmjerenih bušotina;
- odredili kriteriji za odabir alatki;
- ostvarila praksa i steklo iskustvo pri usmjerenom bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi.

Testiranja su provedena u Kanadi s bušaćim postrojenjem posebno izrađenim za testiranje bušenja uz primjenu kolone zaštitnih cijevi. Prve ispitne bušotine s otklonom kanala bušotine do 86° izrađene su primjenom zaštitnih cijevi promjera 0,1397 m (5 ½"), odnosno s otklonom kanala od 90° izrađene primjenom zaštitnih cijevi promjera 0,1778 m (7"). Na ovaj način je dokazano da je moguće usmjereno bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi, čak i kod bušotina s relativno velikim kutom otklona kanala bušotine. Najveći otklon kanala bušotine pri kojem se moglo spuštati i izvlačiti alatke bio je između 45° i

50°. Kada bi otklon kanala bušotine premašio navedene vrijednosti, bilo je potrebno djelomično izvaditi zaštitne cijevi kako bi se moglo manevrirati sklopom alatki na dnu. Nakon razvoja druge generacije alatki za potiskivanje uslijedila su dodatna testiranja uz promjenu zaštitnih cijevi promjera 0,1397 m (5 ½"), 0,1778 m (7") i 0,3397 m (13 3/8"). Dodatna testiranja provedena su kako bi se:

- pokazala mogućnost kontroliranog usmjeravanja bušotine;
- otklonili uočeni nedostatci alatki na dnu bušaćeg niza;
- definirala radna procedura;
- definirale granice praktične primjene ovakvih sklopova alatki.

Rezultati provedenih terenskih testiranja nove opreme prikazani su u (tablica 3-1).

Tablica 3-1. Rezultati terenskog testiranja nove opreme za usmjereno bušenje uz primjenu niza zaštitnih cijevi (Warren et al., 2003)

Promjer zaštitnih cijevi. m, (in)	Točke početka izrade zakrivljene dionice (m)	Duljina izbušenog kanala (m)	Prosječno povećanje kuta otklona kanala bušotine (°/100 m)	Maksimalni otklon kanala bušotine (°)
0,139 (5 1/2")	195	415	26-39	86
0,139 (5 1/2")	310	155	33-46	60
0,1778 (7")	520	370	20-26	90
0,1778 (7")	530	140	13-20	10
0,139 (5 1/2")	185	610	20-26	70
0,1778 (7")	405	470	20-26	54
0,1778 (7")	730	430	20-26	93
0,139 (5 1/2")	250	705	20-33	91
0,139 (5 1/2")	580	350	13-20	84
0,3397 (13 3/8")	100	605	6.5-10	19

Ukupno je bušeno s tri različita promjera zaštitnih cijevi ukupnu duljinu kanala od 4250 m (13951 ft) s najvećim kutom otklona od 93°. U nastavku će detaljno biti opisan postupak izrade kanala bušotine pomoću dva različita promjera zaštitnih cijevi koja su provedena u

ovoj testnoj fazi ispitivanja primjene zaštitnih cijevi za izradu usmjerenih bušotina (Warren et al., 2003).

3.3.1. Izrada usmjerene bušotine primjenom zaštitnih cijevi promjera 0,1778 m (7")

Usmjerena bušotina izbušena je primjenom niza zaštitnih cijevi promjera 0,1778 m (7") i jedinične mase 34,22 kg/m, izrađenih od čelika kvalitete L-80 i druge generacije sklopa za zabravljivanje te je simulirana izrada zakrivljene dionice plitke horizontalne bušotine. Svrha testa bila je pokazati kako se niz zaštitnih cijevi može koristiti za bušenje zakrivljene dionice kanala bušotine uz istovremenu kontrolu smjera i otklona kanala bušotine (tablica 3-2). Prilikom bušenja korišten je 3,8 stupanjski motor promjera 0,127 m (5") s otklonom kućišta od 1,15°, te PDC dlijetom i PDC proširivačima s reznim elementima veličine 0,013 m. Prosječno povećanje kuta otklona kanala bušotine iznosilo je 16,4 °/100 m. Bušotina je izrađena vertikalno do točke skretanja kanala bušotine (504 m), nakon čega je povećan kut otklona do 34° s omjerom klizanja i rotacije alata od 34%. Nakon postizanja kuta otklona od 34° započela je izrada tangencijalnog dijela kanala bušotine rotacijskim načinom do stvarne dubine od 709 m. Povećanje kuta otklona kanala bušotine je nastavljeno do 54°, no tijekom tog procesa dva uzastopna mjerenja pokazala su preveliko povećanje kuta otklon kanala bušotine od 26,25°/100 m, odnosno dosegnuta je granica zakrivljenosti kanala s obzirom na maksimalno savijanje zaštitnih cijevi do granice elastičnosti zaštitnih cijevi. Kako bi se izbjeglo oštećenje zaštitnih cijevi postavljen je čep na dnu tangencijalnog djela kanala. Bušotina je skrenuta koristeći otklon kućišta motora od 1,5°, a samo bušenje je nastavljeno s otklonom kućišta od 1.15° i postignut je konačni kut otklona kanala bušotine od 89° nakon čega je izrađena pravocrtna dionica bez poteškoća. Bušenje je zahtijevalo veći omjer klizanja prema rotiranju, nego što je to potrebno kod konvencionalnog usmjerenog bušenja. Kao i kod usmjerenih bušotina izrađenih konvencionalnim nizom bušaćih alatki napredovanje dlijeta je značajno smanjeno tijekom klizanja alatki, bez većih dodatnih problema (Warren et al., 2003).

Tablica 3-2. Ispitivanje mogućnosti primjene zaštitnih cijevi promjera 0,1778 m (7") za izradu usmjerene bušotine (Warren et al., 2003)

Duljina kanala (m)	Kut otklona (°)	Udio klizanja niza bušaćih alatki tijekom bušenja pojedinih dionica (%)	Prosječno povećanje kuta otklona kanala (°/100 m)	Maksimalno povećanje kuta otklona kanala (°/100 m)
504-710	1,3-34,4	34	15	20
710-748	34,4-34,5	3	--	--
748-865	34,5-54,4	42	20	26
Postavljanje čepa i skretanje kanala				
780-940	35-69	35	19	25
940-1055	69-89	46	15	22
1055-1168	89-89,7	4	--	--

3.3.2. Izrada usmjerene bušotine primjenom zaštitnih cijevi promjera 0,3397 m (13 3/8")

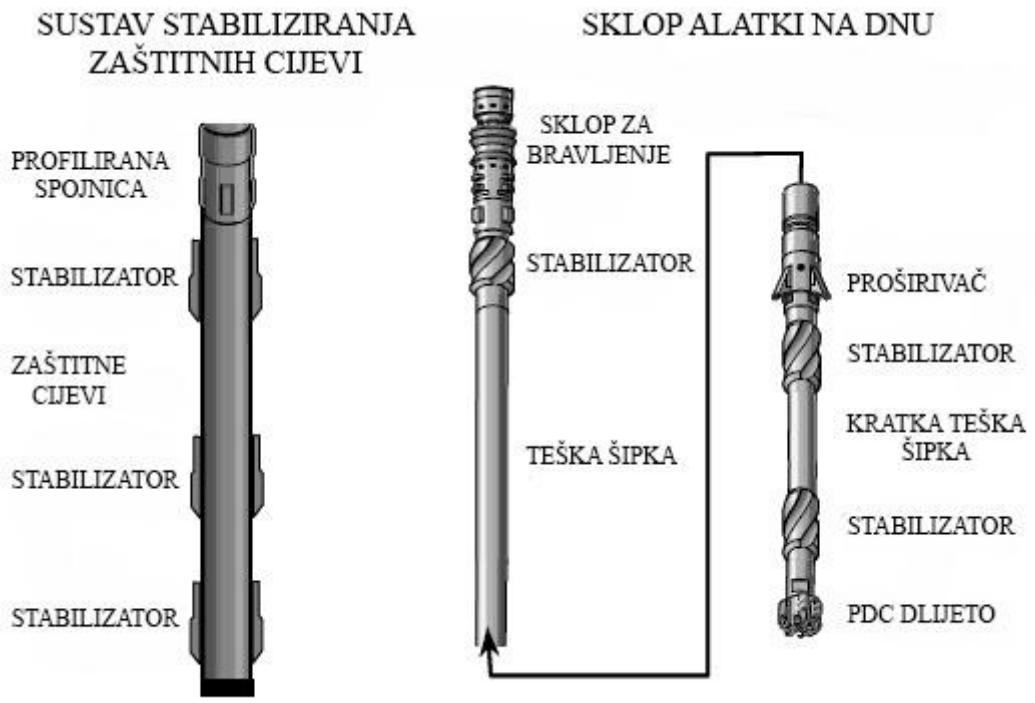
Usmjereno bušenje obavljeno je uz primjenu zaštitnih cijevi promjera 0,3397 m (13 3/8") jedinične mase 81,10 kg/m, izrađenih od čelika kvalitete J-55. Bušenje zakrivljene dionice počelo je povećanjem kuta otklona kanala bušotine od 7°/100 m sve do postizanja kuta otklona kanala bušotine od 20°. Nakon toga bušenje je nastavljeno zadržavanjem kuta otklona kanala bušotine sve do točke kada je započeto smanjivanje kuta otklona kanala bušotine. Ovakav dizajn bušotine nameće najteže uvjete usmjerenog bušenja pomoću zaštitnih cijevi promjera 0,3397 m (13 3/8"), koji se mogu susresti kod bušenja za uvodnu kolonu, testirajući sposobnost skretanja kanala bušotine u vrlo mekanim pješčenjacima. Bušaći sklop alatki bio je sastavljen od dlijeta promjera 0,3111 m (12 ¼"), proširivača promjera 0,4064 m (16"), motora promjera 0,2032 m (8") s otklonom kućišta od 1,5°, sklopa alatki za mjerenje tijekom bušenja i nemagnetske teške šipke promjera 0,2032 m (8"). Zbog zarušavanja nekosolidiranih pješčenjaka oko usmjerivača promjera 0,508 m (20“), ugrađena je i cementirana uvodna kolona promjera 0,4064 m (16") na stvarnoj dubini od 120 m. U početku izrade zakrivljene dionice kanala bušotine zbog iznimno

mekih formacija postignuta je relativno velika brzina bušenja od nekoliko desetaka do stotinjak metara po satu s malim opterećenjem na dlijeto. Uz 80% klizanja alata ostvareno je prosječno povećanje kuta otklona kanala bušotine od 5°/100 m do stvarne dubine 330 m ispod koje se nalaze čvršće formacije. Ispod navedene dubine pomoću klizanja niza bušaćih alatki od 60% te uz prosječno povećanje kuta otklona kanala bušotine od 7°/100 m postignut je kut otklona od 19° na stvarnoj dubini od 510 m, nakon čega se pristupilo bušenju tangencijalne sekcije duljine 70 m. Otklon kanal bušotine se smanjivao za 0,5°/100 m za vrijeme bušenja tangencijalne dionice kanala bušotine. Nakon toga nastavljeno je kontrolirano smanjenje kuta otklona kanala bušotine sa 18,7° na 13° uz prosječnu vrijednost smanjenja kuta otklona od 5,5°/100 m. Dionica s povećanjem otklona kanala bušotine uključivala je lagano skretanje u desno, dok je sekcija smanjenja otklona kanala bušotine uključivala lagano skretanje u lijevo. Na taj je način pokazana mogućnost kontrole kako kuta otklona tako i smjera kanala bušotine (Warren et al., 2003).

3.3.3. Kontrola otklona

Prethodno opisani testovi pokazali su da usmjerene bušotine mogu biti izrađene uz primjenu kolone zaštitnih cijevi. U nastavku će biti opisani problemi koje bi trebalo razmotriti prilikom odabira sklopa alatki na dnu koji će se koristiti za kontrolu otklona ili usmjereno bušenje. Kod jednostavnog bušenja vertikalne bušotine logično bi bilo smjestiti stabilizatore u donji dio bušaćeg niza kako bi se učinkovito kontroliralo moguće otklone kanala bušotine prilikom bušenja. Stabiliziranje i centriranje zaštitnih cijevi u sredinu bušotine, uz pomoć njihove krutosti trebalo bi omogućiti pravocrtno bušenje, što nažalost nije uvijek slučaj. Na temelju podataka dobivenih s bušotina u južnom Texasu uočeno je da stabiliziranje donjeg dijela niza zaštitnih cijevi rezultira velikim lateralnim opterećenjima i habanjem stabilizatora što nije rezultiralo adekvatnom kontrolom otklona kanala. Osnovni uzrok habanja stabilizatora i loše kontrole kuta otklona je taj što zaštitne cijevi nisu u potpunosti ravne, a uzrok tome može biti činjenica da zaštitne cijevi nakon proizvodnje izlaze potpuno ravne, ali s određenim ostatkom naprezanja do čijeg oslobađanja dolazi nakon spajanja zaštitnih cijevi. Razvijen je alternativni postupak kontrole otklona kanala na način da se zaštitne cijevi koriste za prenošenje mehaničke i hidrauličke energije na sklop alatki na dnu koje su odvojene od krutosti i lateralnih kretnji zaštitnih cijevi.

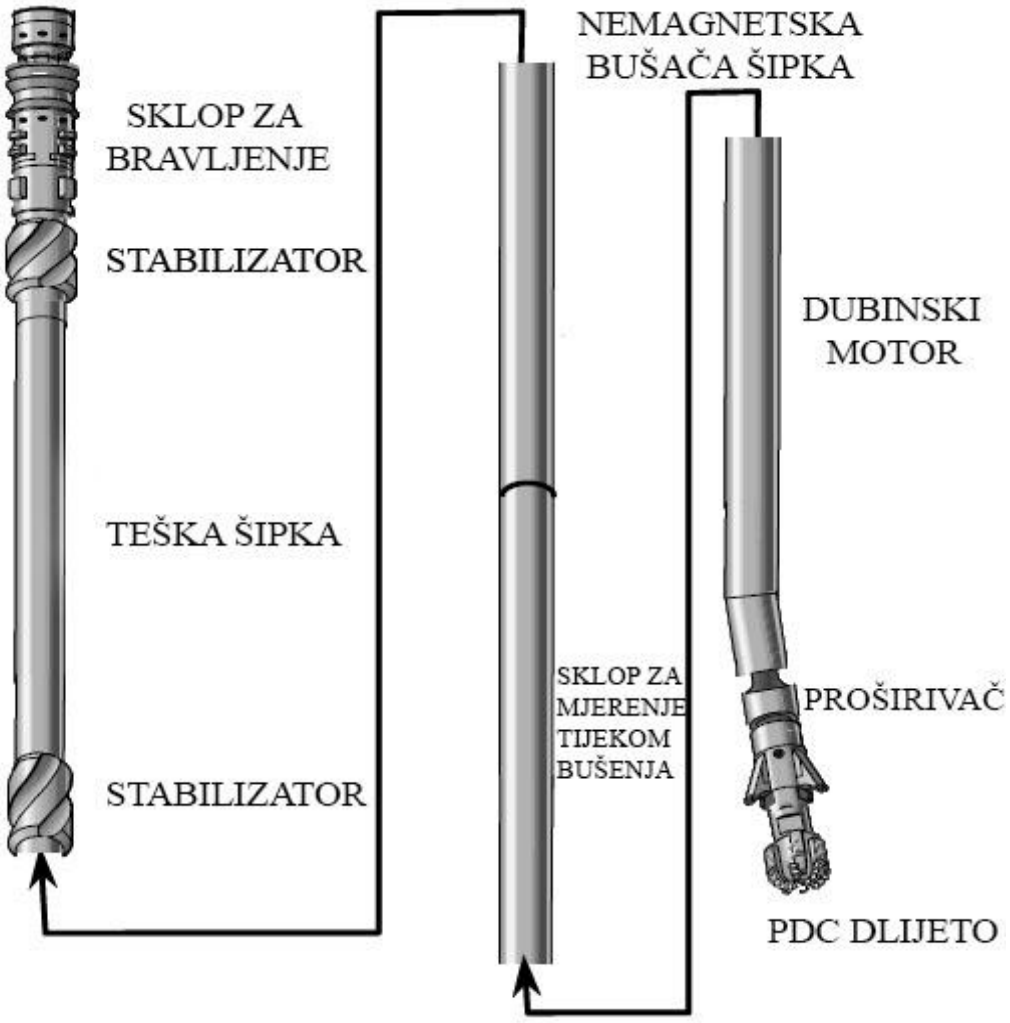
Ugradnjom stabilizatora u bušaći sklop uvodnog kanala kose bušotine između pilot-dlijeta i proširivača pruža mogućnost kontrole otklona kanala bušotine. Stabilizatori se i u ovom slučaju nalaze na dnu niza zaštitnih cijevi radi ravnomjernog rasporeda cementne kaše oko cijevi te kako ne bi došlo do nenamjernog spuštanja zaštitnih cijevi u suženi dio kanala bušotine. Sklop alatki na dnu mora biti stabiliziran tako da omogući bušenje bušotine većeg promjera od promjera zaštitnih cijevi, uz primjenu alatki kojima se može manipulirati kroz unutarnji promjer zaštitnih cijevi. To isključuje upotrebu stabilizatora s fiksnim elementima iznad proširivača. Smještanje stabilizatora u pilot kanal bušotine, omogućuje kontrolu otklona kanala bušotine uz mogućnost manipulacije sklopom alatki na dnu. Relativno savitljiva šipka spaja gornji dio proširivača sa sklopom za zabravljivanje kako bi se djelomično spriječio prijenos bočnog kretanja zaštitnih cijevi na proširivač. Sklop za bravljenje se postavlja oko 6 m iznad pete zaštitnih cijevi čime se sprječava prenošenje bilo kakve ekscentrične rotacije zaštitnih cijevi na proširivač. Upotrebom ovakvog sklopa postignuta je učinkovita kontrola otklona kanala bušotine.



Slika 3-3. Sklop za kontrolu otklona kanala (Warren et al., 2003)

Osnovno načelo za kontrolu otklona kod vertikalne bušotine je stabiliziranje alatki za izradu pilot kanala bušotine čime se postiže vertikalni kanal bušotine, dok zaštitne cijevi

prate putanju bušotine bez većih problema (slika 3-3). Takvu kontrolu otklona znatno je teže postići kod usmjerenih bušotina, zbog potrebe za bušenjem dijela bušotine bez rotacije alatki (klizanjem alatki) zbog čega proširivač mora biti smješten ispod uronjenog motora, odnosno direktno iznad dlijeta (slika 3-4). Zbog toga je stabilizator ugrađen u proširivač direktno ispod reznih elemenata. Stabilizatori manjeg promjera od konačnog promjera kanala bušotine mogu biti smješteni između pete zaštitnih cijevi i proširivača. Kako je već ranije rečeno kod zaštitnih cijevi većeg promjera ne dolazi do većih problema, te je sustav sa zaštitnim cijevima promjera 0,1778 m (7") i 0,3397 m (13 3/8") moguće usmjeravati u željenom smjeru. Kod izrade bušotina manjeg promjera često se zahtijeva veće povećanje kuta otklona kanala bušotine, što je znatno teže postići s nestabiliziranim sustavom s upravljivim motorom. Također, kod upotrebe motora manjeg promjera znatno je lakše povećati otklon kanala bušotine nego ga smanjiti. Naprimjer, kod upotrebe zaštitnih cijevi promjera 0,1397 m (5 ½") s pilot dlijetom promjera 0,1206 m (4 ¾"), proširivačem promjera 0,1905 m (7 ½") i motora s otklonom kućišta 1,5° lako se može ostvariti povećanje kuta otklona bušotine i do 30°/100 m. Međutim, kada se želi nakon dosegnutih 90° smanjiti kut otklona, to često nije moguće čak ni uz 100%-tno klizanje. Upotrebom proširivog stabilizatora iznad motora eliminira se ovaj problem. Odabir motora s određenim otklonom kućišta zahtijeva dodatno razmatranje. Motor, proširivač i pilot-dlijeto moraju proći kroz unutarnji otvor zaštitnih cijevi koji može biti samo nekoliko milimetara veći od promjera kućišta motora. Ova činjenica ograničava kut otklona kućišta na kut koji je možda manji no što je potreban za bušenje određene zakrivljene dionice konvencionalnim sastavom alatki. Manji kut nagiba kućišta povećava odnos klizanja prema rotaciji. Idealno za kontrolu otklona kod usmjerenih bušotina bi bilo smjestiti rotacijski upravljivi sustav u dio niza alatki za izradu pilot bušotine ispod proširivača, to bi omogućilo veće vrijednosti konstantnog povećanja otklona kanala bušotine i eliminiralo probleme vezane uz klizanje (Warren et al., 2003).



Slika 3-4. Izvlačivi sklop (Warren et al., 2003)

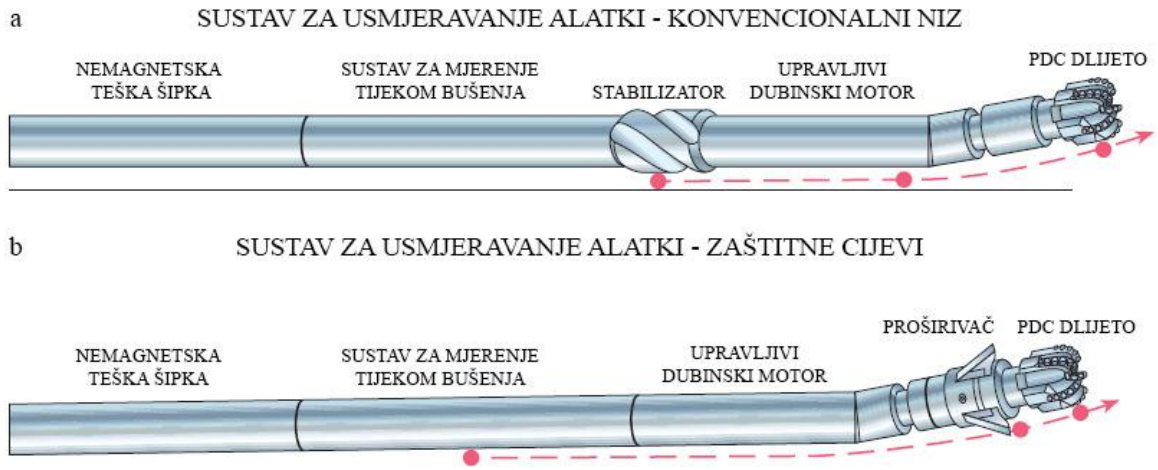
3.4. Izrada usmjerenih bušotina pomoću zaštitnih cijevi i upravljivog dubinskog motora

Bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi i upravljivog dubinskog motora ukazalo je na tri ograničenja vezana uz:

- geometriju sklopa alatki na dnu niza zaštitnih cijevi;
- performanse motora;
- primjenu u praksi.

Kod izvlačivog sklopa alatki na dnu, upravljivi dubinski motor smješten je iznad proširivača i pilot-dlijeta kako bi omogućio njihovu rotaciju. Takva konfiguracija

omogućava bušenje uz klizanje odnosno bez rotacije cjelokupnog niza zaštitnih cijevi. Rezultat toga je promijenjena geometrija sklopa alatki na dnu za kontrolu otklona i smjera kanala bušotine u odnosu na konvencionalni sastav alatki na dnu za usmjereno bušenje uz primjenu konvencionalnog bušaćeg niza. Kod sustava za usmjeravanje alatki kod konvencionalnog niza bušaćih alatki (slika 3-5 a) postoje tri karakteristične točke (dlijeto, umetak na vanjskoj strani kućišta motora i stabilizator iznad motora) koje određuju geometriju za povećanje kuta otklona kanala bušotine. Stabilizator i umetak na motoru nemaju reznih elemenata, a geometrija i krutost sklopa alatki na dnu usmjeravaju dlijeto da buši u željenom smjeru. Kod primjene zaštitnih cijevi za izradu kanala bušotine (slika 3-5 b), također postoje tri karakteristične točke koje nisu definirane na isti način kao kod bušenja uz primjenu konvencionalnog niza bušaćih alatki. Najdonja točka je i dalje dlijeto no druga točka se nalazi na proširivaču, a treća na sustavu za mjerenje tijekom bušenja.



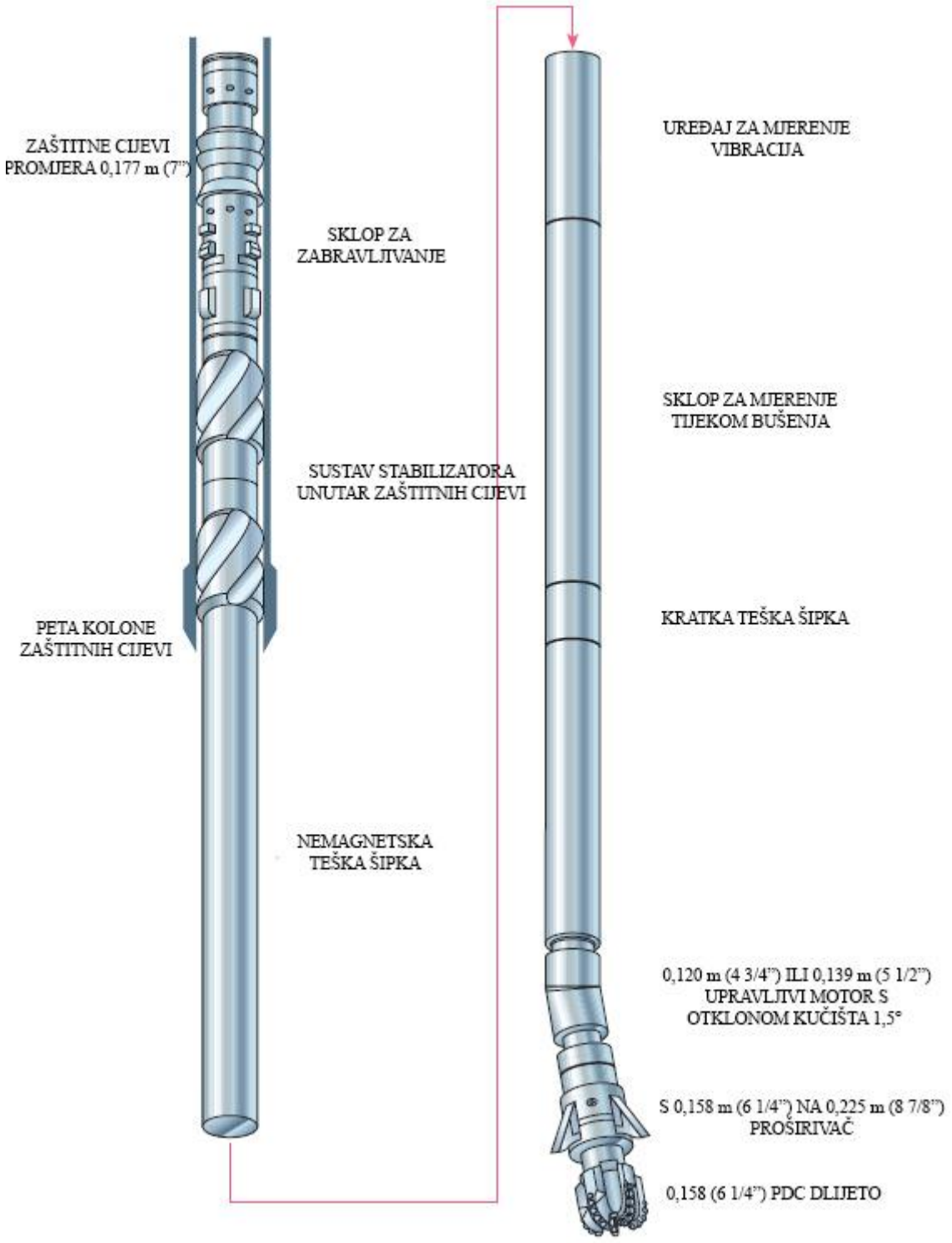
Slika 3-5. Usporedba sustav za usmjeravanje alatki konvencionalnog niza bušaćih alatki i niza zaštitnih cijevi (Fontenot et al., 2005)

Sustav za usmjereno bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi mora imati takve dimenzije da slobodno prolazi kroz unutarnji otvor zaštitnih cijevi, što znači da su cjelokupni sklop alatki na dnu i upravljivi dubinski motor relativno malih dimenzija u odnosu na promjer bušotine. Takve dimenzije limitiraju kut otklona motora jer umetak (*engl. contact pad*) na vanjskoj strani kućišta motora često ne dotiče kanal bušotine. Umjesto toga stabilizator koji se nalazi ispod proširivača, koristi se kao druga dodirna točka za usmjeravanje alatki. Motor manjih dimenzija također omogućava veću fleksibilnost sklopa alatki na dnu zbog čega je dodatno otežano održavanje kontrole otklona kanala bušotine. Cjelokupni sklop je nagnut pod većim kutom unutar bušotine s

tendencijom povećanja kuta otklona kanala bušotine, a što ima za posljedicu otežano smanjenje kuta otklona kanala bušotine. Dodatkom proširivog stabilizatora ili proširivača s umetcima bez reznih elemenata iznad motora, smanjuje tendenciju povećanja kuta otklona kanala bušotine i omogućuje smanjenje kuta otklona tijekom klizanja, no zbog toga je sastav alatki na dnu kompleksniji. Sljedeći problem javlja se kada uronjeni motor dosegne veće vrijednosti okretnog momenta uz povećanje tlaka cirkulacije uslijed čega, dolazi do produljenja bušaćeg niza. Dlijeto se nalazi na dnu a niz zaštitnih cijevi se uslijed povećanja tlaka produljuje, što uzrokuje povećanje opterećenja na dlijeto, odnosno povećanje opterećenja uronjenog motora zbog potrebe za većim okretnim momentom, a to sve rezultira povećanjem tlaka cirkulacije. Ovaj efekt se pojavljuje ciklički i uzrokuje zatajenje ili potpuno zaustavljanje motora. Problem se povećava zbog zaštitnih cijevi koje imaju veću tendenciju izduživanja pri većem unutrašnjem tlaku od bušaćih šipki. Primjerice za određeno povećanje unutarnjeg tlaka, povećanje opterećenja na dlijeto, za zaštitne cijevi promjera 0,1778 m (7") je šest puta veće nego za bušaće šipke promjera 0,889 m (3 ½") kod upotrebe motora istih dimenzija i performansi. Kod dubljih bušotina i povećanog trenja unutar kanala bušotine, povećanje opterećenja na dlijeto teško se detektirati na površini. Kao rezultat toga postoji mogućnost da dođe do zaustavljanja motora prije no što su poduzete preventivne mjere. Za ublažavanje ovih problema koriste se motori manje snage. Primarni problem kod motora manjih dimenzija jest relativan nedostatak snage u odnosu na motore većih dimenzija. Odabir motora optimalnih dimenzija je od primarne važnosti, posebno kod zaštitnih cijevi promjera 0,1778 m (7") i manjeg. Motori s manjom brzinom rotacije, ali s većim okretnim momentom u slučajevima povećanog tlaka su lakše upravljivi. Isto tako dlijeto s manje „agresivnim“ reznim elementima koji ne prodiru duboko u formaciju pridonosi poboljšanju performansi motora. Svi navedeni faktori smanjuju efikasnost i napredak bušenja kod upotrebe zaštitnih cijevi kao bušaćeg niza. Kod zaštitnih cijevi promjera 0,2444 m (9 5/8") i većih razmatranje snage motora je manje kritično, zbog mogućnosti upotrebe motora većih dimenzija. Ponovno pokretanje motora i reorijentiranje sklopa alatki na dnu zahtjeva manje vremena kod primjene zaštitnih cijevi zbog veće krutosti od bušaćih šipki (Fontenot et al., 2005).

3.4.1. Primjena niza zaštitnih cijevi i upravljivog dubinskog motora za izradu usmjerene bušotine

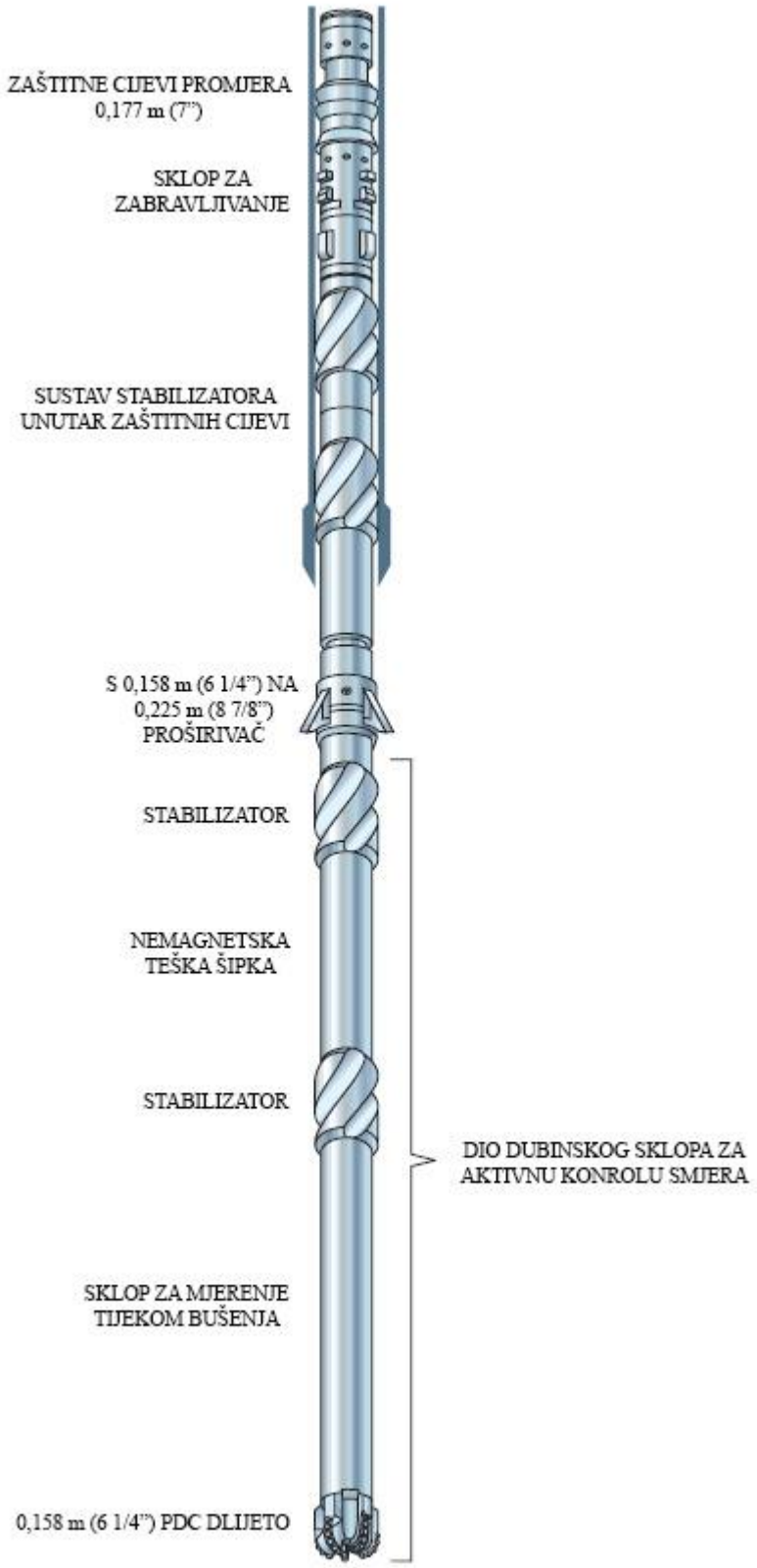
Ograničenja i prednosti upravljivih dubinskih motora kod izrade usmjerene bušotine uz primjenu zaštitnih cijevi vidljiva su iz pokusnih bušenja izvedenih u južnom Texas-u. Kompanija ConocoPhillips izradila je dvije bušotine primjenom izvlačivog sklopa alatki na dnu i upravljivog dubinskog motora. Kako bi se izradilo bušotinu trajektorija je projektirana u obliku slova S bilo je potrebno povećati otklon kanala bušotine od 15°, te vratiti trajektoriju kanala bušotine približno vertikali, kako bi se dosegnula podzemna ciljana zona. Bušotina Lobo 83 izbušena je vertikalno do točke skretanja kanala bušotine na dubini od 1351 m gdje je sklop alatki za vertikalno bušenje izvučen pomoću opreme na žici i zamijenjen sklopom alatki na dnu za usmjereno bušenje koji uključuje upravljivi dubinski motor promjera 0,1206 m (4 ¾") (slika 3-6).



Slika 3-6. Sklop alatki na dnu s upravljivim motorom za povećanje kuta otklona (Fontenot et al., 2005)

Povećanje kuta otklona kanala bušotine i postizanje zadanog smjera zahtijevalo je isprekidano bušenje klizanjem alatki do dubine 1465 m. Upravljivi dubinski motor

promjera 0,1206 m (4 ¾") zamijenjen je nakon samo izbušenih 47 m, motorom promjera 0,1397 m (5 ½") zbog potrebe za većim okretnim momentom pri manjem tlaku i brzinama rotacije. Nakon dosezanja kuta otklona kanala bušotine od 10° bušenje je nastavljeno rotacijski, što je omogućilo povećanje kuta otklona na 15°. Povećanje kuta otklona kanala bušotine relativno je lako ostvareno, no smanjenje je zahtijevalo kontinuirano bušenje uz klizanje alata. Bušenje klizanjem ponovo je započelo na dubini od 1717 m kako bi se putanja uz klizni način rada vratila u vertikalni položaj. Iako je zamijenjen motor zabilježen je veliki broj zatajenja, što je zahtijevalo manju brzinu motora i manji okretni moment tijekom bušenja u kliznom načinu rada. Ponovan nastavak bušenja nakon zatajenja motora brži je kod primjene kolone zaštitnih cijevi u odnosu na bušaće šipke. Zaštitne cijevi su dovoljno krute zbog čega nije potrebna reorijentacija alatki, dlijeto je jednostavno žicom zadignuto, kako bi se omogućilo ponovno pokretanje motora. Bušenje u kliznom načinu rada bez rotacije cjelokupnog niza zaštitnih cijevi znatno je smanjilo napredak bušenja, što je potvrdilo ranije uočena ograničenja kod primjene upravljivog dubinskog motora. Nakon što je kut kanala bušotine dosegnuo 10°, upravljivi dubinski motor je zamijenjen rotacijskim sklopom alatki na dnu s proširivačem postavljenim neposredno ispod pete kolone (slika 3-7).



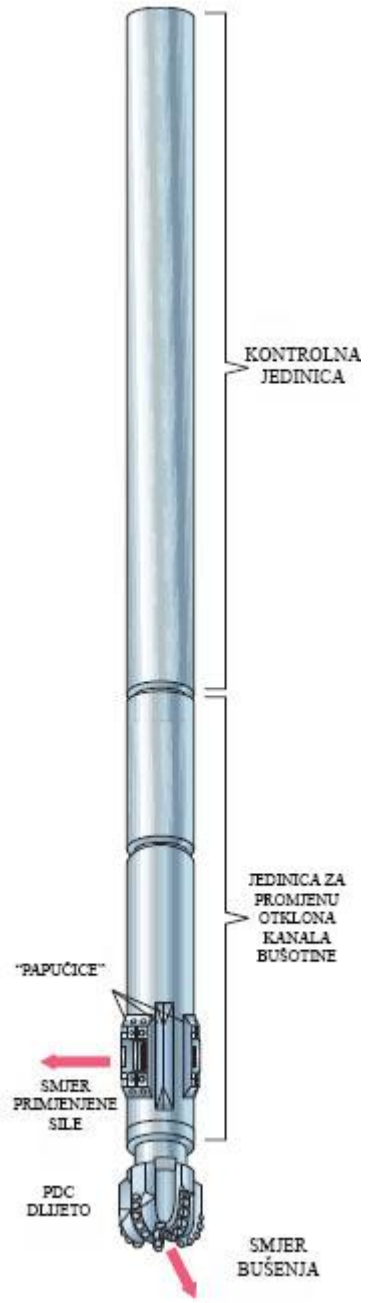
Slika 3-7. Rotacijski sklop alatki na dnu za postizanje i održavanje vertikalnosti kanala bušotine (Fontenot et al., 2005)

Bušenjem s rotacijskim sklopom alatki postignut je kut otklona od 2° koji je zadržan sve do konačne dubine od 2396 m. Brzina napretka dlijeta bila je značajno veća prilikom rotacijskog bušenja čak i kod ograničenja opterećenja na dlijeto kako bi se smanjio otklon kanala bušotine na unaprijed definiranu vrijednost. Uređaj za praćenje vibracija zabilježio je visoke vrijednosti bočnih vibracija, no došlo je do samo nekoliko zatajenja motora. Usmjereno bušenje sa ovim sklopom alatki potvrdilo je da je moguće kontrolirati otklon kanala bušotine u pilot kanalu bušotine (*engl. pilot hole*), čak i ako se u sastavu nalazi proširivač na određenoj udaljenosti od dlijeta. Također je uočeno da usmjereno bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi i upravljivog dubinskog motora nije efikasno u bušotinama manjeg promjera. Primjena upravljivog dubinskog motora pokazala je da je moguće bušiti usmjerene bušotine uz primjenu kolone zaštitnih cijevi ali efikasnost bušenja nije konkurentna u odnosu na upotrebu novijeg upravljivog sustava (Fontenot et al., 2005).

3.5. Izrada usmjerenih bušotina uz primjenu upravljivog sustava (engl. Rotary Steerable System - RSS) i niza zaštitnih cijevi

RSS je primarno razvijen za bušenje usmjerenih, horizontalnih i bušotina velikog dosega. Prvotno upravljivi sustav se koristio za bušenje dubokih usmjerenih bušotina na moru. Kako se sustav s vremenom poboljšavao, postao jeftiniji, te sa sve većim iskustvom u praksi došlo je do njegove šire upotrebe. Bušenje uz konstantnu rotaciju zaštitnih cijevi učinkovitije je od upotrebe uronjenog motora, čak i kod bušenja vertikalnih bušotina. Kod primjene uronjenog motora mehanička brzina bušenja uglavnom opada s dubinom, dok se istrošenost alatki značajno povećava. Upravljivi sustav ima brojne prednosti u odnosu na upravljive motore poput olakšane orijentacije alatki za kontrolu otklona kanala pri bušenju uz primjenu kolone zaštitnih cijevi, značajno smanjenje ili u potpunosti eliminiranje probleme koji se vežu uz bušenje s klizanjem alata, ograničenja vezana uz uronjeni motor i poteškoće pri održavanju otklona kanala bušotine. Upravljivi sustav se sastoji od (slika 3-8):

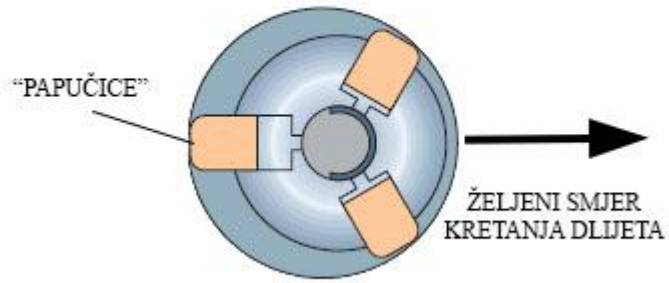
- kontrolne jedinice,
- jedinica za promjenu otklona kanala bušotine,
- PDC dlijeta.



Slika 3-8. Upravljivi sustav (Fontenot et al., 2005)

Kontrolna jedinica i jedinica za kontrolu otklona kanala bušotine, zajedno se još nazivaju „PowerDrive system“ i smještene su u kućištu duljine 3,8 m. Jedinica za promjenu otklona kanala bušotine nalazi se neposredno iznad dlijeta i djeluje određenom silom u određenom smjeru dok se cijeli niz kontinuirano rotira. Kontrolna jedinica koja se nalazi iznad jedinice za promjenu otklona kanala bušotine sadrži senzore i mehanizam za primjenu lateralne sile u određenom smjeru kako bi se postigla željena putanja kanala bušotine. Jedinica za promjenu otklona kanala bušotine sadrži tri „papučice“ (slika 3-9) koji se nalaze na

vanjskoj strani i aktiviraju se kontroliranim protokom isplake kroz njih. Pločasti rotacijski ventil s tri otvora uzastopno usmjerava isplaku u zglobne umetke kako bi se primijenila sila u smjeru suprotnom od željene putanje kanala bušotine. Uslijed djelovanja pojedine „papučice“ dlijeto se konstantno kreće u određenom smjeru suprotnom od smjera djelovanja sile „papučica“. Ukoliko nema potrebe za promjenom smjera sustav radi u neutralnom načinu rada, gdje svaka „papučica“ djeluje u svom smjeru i efekti se međusobno poništavaju (Fontenot et al., 2005).

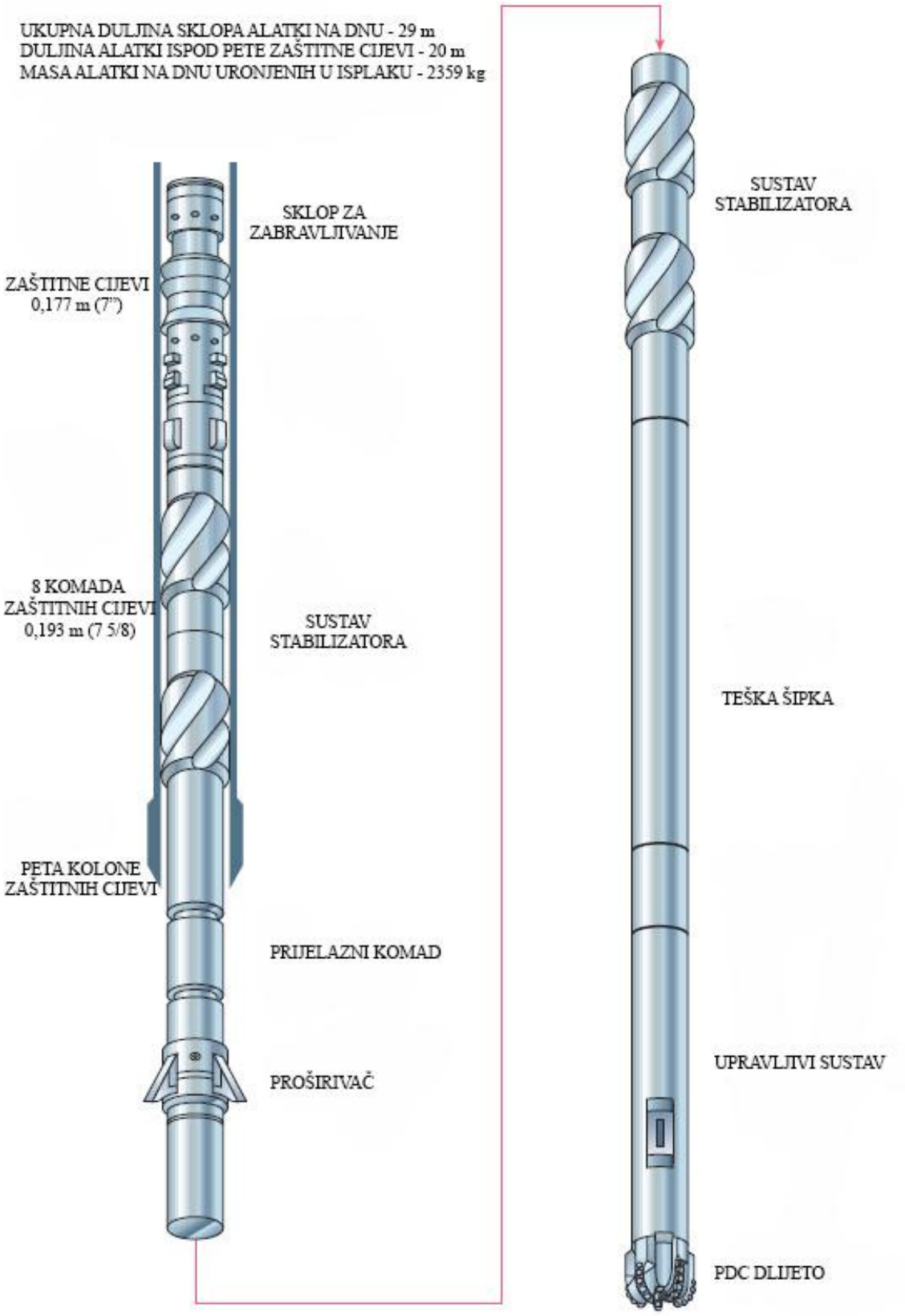


Slika 3-9. „Papučice“ sustava za promjenu otklona kanala bušotine (Fontenot et al., 2005)

3.5.1. Primjena upravljivog sustava

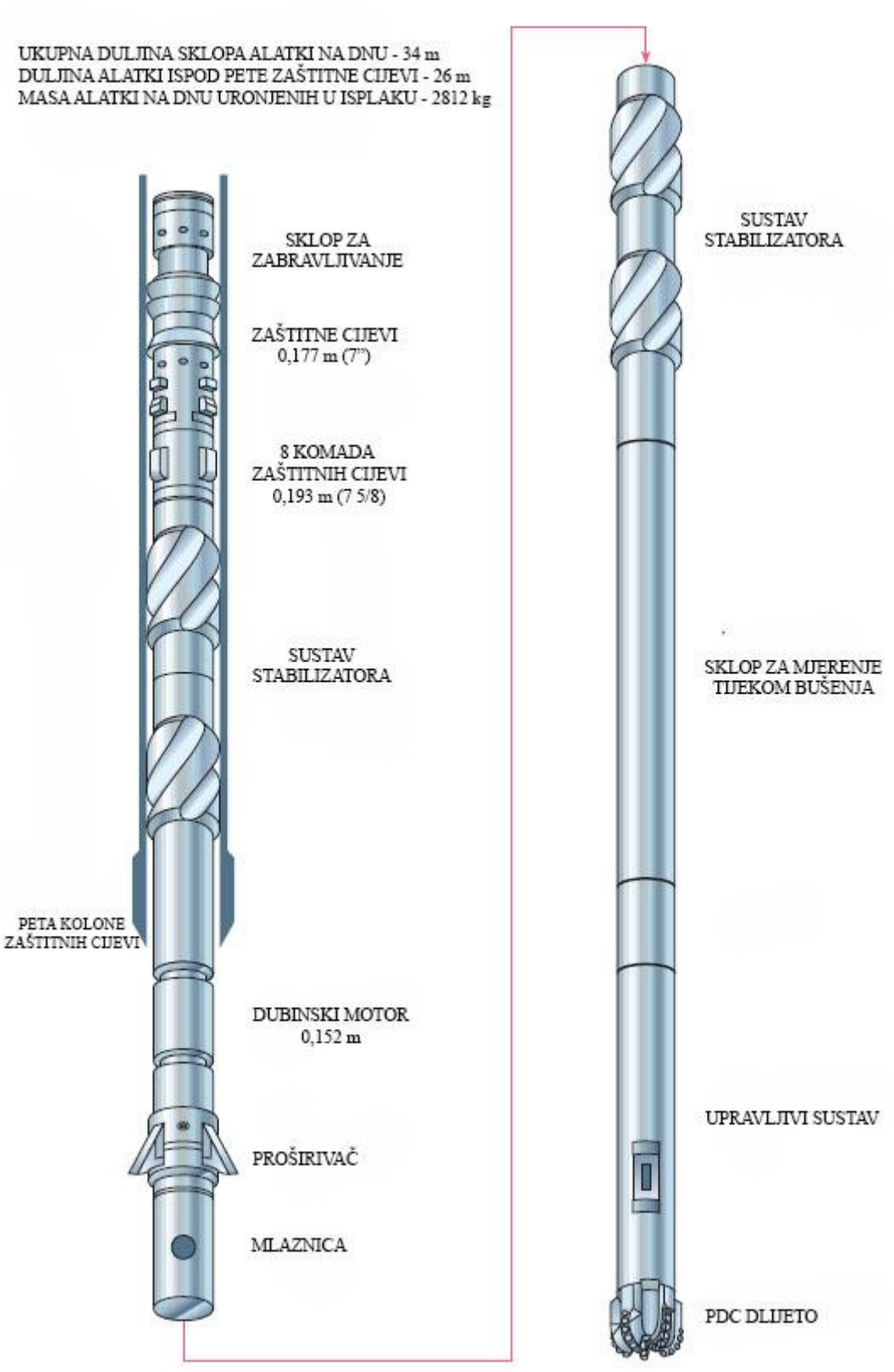
Kompanije ConocoPhillips, Tesco i Schlumberger provele su testiranje upravljivog sustava na dvije bušotine u južnom Texas-u. Prva bušotina, „bušotina 89“ izrađena je vertikalno, na način da je kanal bušotine za uvodnu kolonu izbušen do dubine 179 m primjenom zaštitnih cijevi 0,2444 m (9 5/8") i sklopom alatki na dnu koji se sastoji od pilot-dlijeta 0,2159 m (8 ½") i proširivača 0,3112 m (12 ¼"). Standardnom sklopu alatki na dnu dodan je upravljivi sustav promjera 0,1206 m (4 ¾") („PowerDrive Xtra“ 475 RSS) (slika 3-10), programiran da održi vertikalnost i teška šipka promjera 0,1206 m (4 ¾"). Bušenje je nastavljeno do dubine 1469 m za što je bilo potrebno 105 sati. Mjerenja koja su obavljana svakih 150 m pokazala su mali, odnosno zanemariv otklon od vertikale. Bušenje je nastavljeno bez problema no primijećene su veće vibracije u području sklopa alatki na dnu od očekivanih. Izrada kanala bušotine prekinuta je prema planu zbog zamjene proširivača,

nakon čega je nastavljeno bušenje i dosegnuta konačna dubina od 2323 m. Nakon završetka procesa bušenja sklop alatki na dnu je pregledan i uočeno je zadovoljavajuće stanje alatki. Analiza žiroskopskog mjerenja potvrdila je da je moguće održati vertikalnost uz primjenu upravljivog sustava (Fontenot et al., 2005).



Slika 3-10. Sklop alatki na dnu sa RSS – sustavom za izradu vertikalne bušotine (Fontenot et al., 2005)

Nakon uspješno izrađene vertikalne bušotine Lobo 89 primjenom zaštitnih cijevi i upravljivog sustava, 2004 godine izrađena je i usmjerena bušotina 91 sličnim sastavom alatki (slika 3-11). Prilikom njene izrade korišten je sklop alatki na dnu uz primjenu sklopa za mjerenje tijekom bušenja. Predložena lokacija bušotine 91 udaljena je 366 m južno od bušotine 79 koja je izrađena vertikalno. Stručnjaci iz kompanije ConocoPhillips predložili su upotrebu površinske lokacije bušotine 79, za usmjereno bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi bušotine čija trajektorija ima oblik slova S, kako bi se dosegnula podzemna ciljana zona bušotine 91. Početna zamisao bila je ostvariti otklon kanala bušotine od 29° te potom vertikalno ući u ciljanu zonu. Nažalost, ušće bušotine 79 i površinski objekti nalazili su se između slobodnog prostora za bušaće postrojenje i ciljane zone bušotine 91, stoga je bilo potrebno konstruirati novu trajektoriju bušotine kako ne bi došlo do kolizije kanala bušotina. Iskustvo je pokazalo da u bušotinama s većom dubinom ugradnje uvodne kolone dolazi do većih vibracija u zaštitnim cijevima i većih nestabilnosti dlijeta tijekom nastavka bušenja zbog trenja uslijed kontakta između dva niza zaštitnih cijevi. Problemi vezani uz vibracije i nestabilnost dlijeta trebali bi biti riješeni dodavanjem uronjenog motora iznad proširivača. Svrha uronjenog motora je omogućavanje smanjenja broj okretaja niza zaštitnih cijevi u slučaju povećanih vibracija i nestabilnosti dlijeta. Tako na primjer ukoliko zbog određenih problema dođe do smanjenja rotacije s površine na 50 okretaja u minuti motor omogućava dodatnih 100 okretaja u minuti kako bi se uspostavili optimalni uvjeti za napredak dlijeta. Usmjereno bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi zahtjeva sličnu brzinu rotacije dlijeta kao kod bušenja s konvencionalnim bušaćim nizom od 120 do 180 okretaja u minuti. Proširivač se nalazi direktno ispod uronjenog motora i služi za ostvarivanje konačnog promjera kanala bušotine od 0,2254 m (8 7/8"). Dva stabilizatora promjera 0,1539 m (6 1/16") postavljeni su za smanjenje vibracija. Sklop za mjerenje tijekom bušenja postavljen je ispod stabilizatora. Dok se na samom dnu niza nalaze se upravljivi sustav i pilot-dlijeto promjera 0,1555 m (6 1/8") (Fontenot et al., 2005).



Slika 3-11. Sklop alatki na dnu sa RSS – sustavom za izradu usmjerene bušotine (Fontenot et al., 2005)

Bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi promjera 0,1778 m (7") započelo je na dubini od 390 m, do koje je ugrađena uvodna kolona. Nakon dosezanja dubine točke skretanja kanala bušotine od 640 m, započela je izrada zakrivljene dionice te je prema planu bušenje nastavljeno do dubine 1240 m. Na navedenoj dubini uočen je porast tlaka te je cijeli niz alatki na dnu izvučen na površinu pomoću opreme na žici. Nakon pregleda ustanovljeno je da je došlo do zaglave motora te da postoje manja oštećenja na upravljivom sustavu. Zatim je izmijenjeni sklop alatki na dnu bez motora ponovno spušten u bušotinu. Bušenje je nastavljeno sporije nego u prvom spuštanju alata zbog toga što je rotaciju s površine teško održati iznad 60 okretaja u minuti zbog nedostatka uronjenog motora. Proces je prekinut nakon dolaska zamjenskog uronjenog motora na lokaciju koji je ponovno ugrađen u sklop alatki na dnu. Bušenje je nastavljeno svega 60 m kada je uočen značajan pad mehaničke brzine bušenja. Nakon izvlačenja alata na površinu ustanovilo se da je ugrađen stabilizator pogrešnog promjera 0,1587 m (6 ¼") umjesto 0,1555 m (6 1/8"), odnosno veći od promjera dlijeta koji se ponašao normalno sve do nailaska na tvrđe formacije. Tom prilikom zamijenjen je i proširivač. Bušenje je nastavljeno do dubine od 1652 m gdje je došlo do diferencijalnog prihvata zaštitnih cijevi. Zakrivljena dionica kanala bušotine i usmjerena (tangencijalna) završene su, te je započeto s bušenjem druge zakrivljene dionice kanala bušotine odnosno smanjenje kuta otklona prema vertikali. Bušenje je nastavljeno do dubine 1939 m pri otklonu kanala bušotine 4° od vertikale gdje je primijećen pad tlaka. Pregledom na površini ustanovljen je erozijsko oštećenje na spoju stabilizatora, stabilizator je zamijenjen i bušenje je nastavljeno do konačne dubine 2118 m. Dva slučaj zamjena stabilizatora pogrešnog promjera i zaglava zaštitnih cijevi uzrokovala su ukupno 85 sati ne produktivnog rada. Iskustva kompanije ConocoPhillips na bušotini Lobo 91 dokazala su učinkovitost primjene upravljivog sustava pri bušenju usmjerenog kanala bušotine uz primjenu kolone zaštitnih cijevi (Fontenot et al., 2005).

4. PRIMJENA U PRAKSI

Polje Eldfisk nalazi se u Norveškom sektoru Sjevernog mora i u proizvodnji je od 1979. godine. Eldfisk Bravo je relativno mala proizvodna platforma s integriranom bušaćom platformom (slika 4-1). U cilju održavanja proizvodnje pristupilo se izradi bušotine B-16A pomoću zaštitnih cijevi u nastavku će biti opisane pripremne radnje i proces izrade bušotine.

Slika 4-1. Platforma Eldfisk Bravo (Oilrig-Photos., 2015)

4.1. Primjena novih tehnologija tijekom usmjerenog bušenja pomoću zaštitnih cijevi na polju Eldfisk

Nekoliko novih tehnologija je primijenjeno na bušotini B-16A prilikom usmjerenog bušenja pomoću kolone zaštitnih cijevi:

1. dvostruka bušotinska glava (*engl. Conductor Shared Wellhead*) (slika 4-2) ugrađena je nakon postavljanja konduktor kolone promjera 0,812 m (32"). Postavljanje dvostruke bušotinske glave omogućava bušenje dvije bušotine iz jednog otvora, odnosno postavljanje dvaju neovisnih proizvodnih sustava na površini.
2. zbog dizajna bušotine i usmjerenog bušenja uz primjenu kolone zaštitnih cijevi, potrebno je postaviti vješalicu lajnera, koja bi podnijela razna opterećenja tijekom bušenja (tlak, torzijska i vlačna naprezanja), eliminirala potrebu za upotrebom konvencionalne opreme za postavljanje lajnera, osigurala konstantni unutarnji promjer što omogućava nesmetanu manipulaciju sklopom alatki na dnu pomoću opreme na žici te osigurala plinotjesnost tijekom životnog vijeka bušotine. Ovakav sastav omogućava bušenje do planirane dubine, cementiranje i ponovno vraćanje niza zaštitnih cijevi iznad vješalice lajnera prije bušenja dionice kroz samo ležište.
3. ugradnja dvostruke bušotinske glave zahtijevala je zamjenu postojeće konduktor kolone promjera 0,762 m (30") do dubine 20 m ispod morskog dna, konduktor kolonom promjera 0,812 m (32") pomoću klina koji je ugrađen u napuštenu bušotinu.
4. tijekom bušenje korištena je isplaka na bazi ulja s usitnjenim baritom (*engl.Treated Micronized Barite Slurry Oil Based Mud - TMBSOBM*) (Bourassa et al., 2008).

Slika 4-2. Dvostruka bušotinska glava (Bourassa et al., 2008)

4.2. Planiranje projekta

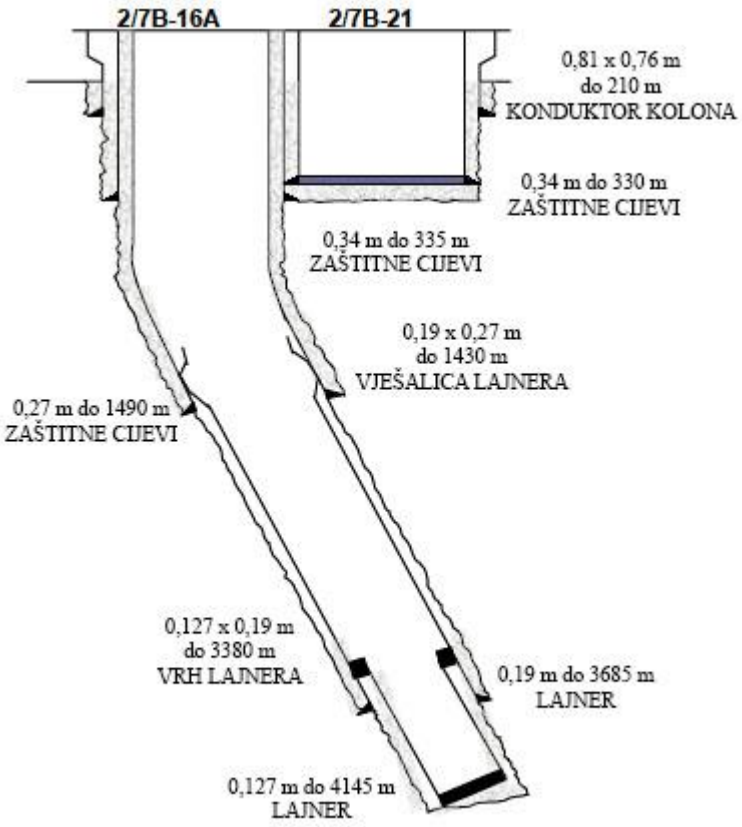
Planiranje bušotine B-16A započelo je paralelno s kopnenim ispitivanjima čiji je cilj bio potvrda tehnologije usmjerenog bušenja uz primjenu kolone zaštitnih cijevi te primjena upravljivog sustava. Prvi test na kopnu proveden je u srpnju 2005. godine a drugi test u studenom 2005. godine. Oba izvedena testa dala su pozitivne rezultate i važne podatke za buduće odobalne operacije u Norveškoj (Bourassa et al., 2008).

4.3. Konstrukcija bušotine

Kanali bušotina na platformi Eldfisk Bravo uobičajeno se buše skretanjem iz postojećih zacijevljenih kanala bušotine promjera 0,3397 m (13 3/8") ili 0,2444 m (9 5/8"). Povremeno su usmjerene bušotine izrađivane i iz nezacijevljenog napuštenog kanala bušotine. Prema projektu bušotine B-16A točka ugradnje zaštitnih cijevi promjera 0,3397 m (13 3/8") nalaze se na dubini od 335 m, zaštitnih cijevi promjera 0.273 m (10 ¾") na dubini od 1480 m, i zaštitnih cijevi promjera 0.1968 m (7 ¾") na dubini od 2895 m stvarne uspravne dubine bušotine (slika 4-3). Kako bi se mogao postaviti „Conductor Shared Wellhead“ sustav i kako bi sustav mogao izdržati očekivana torzijska i vlačna naprezanja bušotina je konstruirana na sljedeći način.

- konduktor kolona promjera 0,812 m (32") do dubine 33,22 m te konduktor kolona promjera 0,762 m (30") do dubine 210 m,
- zaštitne cijevi promjera 0.3397 m (13 3/8") unutar konduktor kolone, (bušotina B-16A do dubine 335 m i bušotina B-21 do dubine 310 m),
- zaštitne cijevi promjera 0.273 m (10 ¾") do 1480 m stvarne vertikalne dubine odnosno 1490 m mjerene duljine kanala bušotine,
- lajner promjera 0.1968 m (7 ¾") do 2895 m stvarne vertikalne dubine odnosno 3685 m mjerene duljine kanala bušotine, s vrhom lajnera na 1305 m mjerne duljine kanala bušotine,

- lajner promjera 0.127 m (5") do 3185 m stvarne vertikalne dubine odnosno 4145 m mjerene duljine kanala bušotine, s vrhom lajnera na 3380 m mjerene duljine kanala bušotine (Bourassa et al, 2008).



Slika 4-3. Konstrukcija bušotine B-16A (Bourassa et al., 2008)

4.4. Torzija i nateg tijekom usmjerenog bušenja pomoću zaštitnih cijevi

Računalni model torzije i natega za planiranu bušotinu B-16A pokazao je prema očekivanju veće vrijednosti torzije i natega u odnosu na primjenu konvencionalnog niza zbog samog promjera i težine zaštitnih cijevi. Na manjim dubinama torzija je najosjetljivija na nagle promjene zakrivljenosti kanala bušotine (*engl. dog-leg*), najviše zbog krutosti zaštitnih cijevi. Kako bi se predvidjela očekivana torzija tijekom bušenja, izračunati su faktori trenja za lajnere promjera 0,254 m (10") koji su ugrađeni na susjednim Ekofisk bušotinama na mjerenoj duljini kanala bušotine od 1460 m do 3650 m. Iz dobivenih podataka izračunat je faktor trenja za pokrovne stijene, koji je iznosio 0,14. Vrijednost

dobivenog faktora trenja uzeta je u obzir sa zadrškom zbog toga što se na bušotinama polja Ekofisk koristila isplaka na bazi ulja dok je za bušotinu B-16A planirana upotreba uljne isplake s usitnjenim baritom. Kod laboratorijskih ispitivanja uljna isplaka s usitnjenim baritom davala je i do 20% manje faktore trenja nego što je to kod standardne isplake na bazi ulja. Pouzdana predviđanja faktora trenja potrebna su za određivanje momenta dotezanja zaštitnih cijevi i odabir vršnog pogona koji može efikasno izraditi projektiranu bušotinu (Bourassa et al., 2008).

4.5. Dizajn zaštitnih cijevi

Odabir niza zaštitnih cijevi izveden je uz pomoć komercijalnog računalnog programa. Za razliku od tradicionalne analize u obzir je bilo potrebno uzeti susjednu bušotinu koja će biti izrađena kroz zajedničku bušotinsku glavu postavljenu na konduktor kolonu. Obje bušotine imaju istu konstrukciju kanala bušotine do dubine od 335 m, zbog čega u obzir treba uzeti toplinsko međudjelovanje bušotina. Dodatno u razmatranje je uzet potencijalni među utjecaj proizvodnje iz prve bušotine uz istovremeno utiskivanje vode na drugoj bušotini. Zaštitne cijevi promjera 0,273 m (10 ¾") i 0,1968 m (7 ¾") planirane su da budu dio proizvodnog niza, te su odabrani materijali otporni na H_2S-a do čije pojave može doći tijekom višegodišnje proizvodnje. U razmatranje je također uzeto habanje zaštitnih cijevi tijekom procesa bušenja. Zaštitne cijevi promjera 0,273 m (10 ¾") dizajnirane su tako da omoguće izradu dva bočna kanala bušotine iznad vrha lajnera promjera 0,1968 m (7 ¾") te naprezanje uslijed proširenja vješalice lajnera. Osnovno pitanje kod upotrebe zaštitnih cijevi za usmjereno bušenje jest da li će spoj zaštitnih cijevi izdržati naprezanja tijekom bušenja te istovremeno zadržati sposobnost brtvljenja tijekom životnog vijeka bušotine. Kako bi se riješilo to pitanje odabrana je Tenaris Blue spojnica zaštitnih cijevi (slika 4-4), te je podvrgnut testiranju. Cilj samog testiranja jest potvrditi da će tijekom cijelog životnog vijeka spoj ostvariti plinotijesnost nakon višestrukog savijanja i rotiranja kroz nagle promjene zakrivljenosti kanala bušotine koje se očekuju tijekom bušenja. Zbog dizajna „conductor shared wellhead“ dio zaštitnih cijevi promjera 0,1968 m (7 ¾") trebao je biti pretvoren u lajner. Zaštitne cijevi promjera 0,1968 m (7 ¾") bilo je potrebno postaviti sve do površine tijekom bušenja kako bi oprema za spuštanje i izvlačenje mogla biti postavljena unutar zaštitnih cijevi. Izrađen je poseban sustav vješalice lajnera kako bi se

niz zaštitnih cijevi nakon završetka bušenja pretvorio u lajner, te je izrađena posebna alatka za spuštanje i oslobađanje zaštitnih cijevi iznad vješalice lajnera nakon postavljanja vješalice (Bourassa et al., 2008).

Slika 4-4. Tenaris Blue spojnica zaštitnih cijevi (Tenaris., 2015)

4.6. Odabir isplake i modeliranje hidrauličkih parametra

Kod bušenja uz primjenu kolone zaštitnih cijevi hidraulički parametri moraju biti tako određeni da se zadrži dozvoljena ekvivalentna cirkulacijska gustoća isplake uz postizanje adekvatnog čišćenja kanala bušotine. Taj proces može zahtijevati kako promjene svojstva fluida tako i brzine protoka. Dijelovi sklopa alatki na dnu odabiru se tako da se prilagode navedenim ograničenjima uz to da istovremeno budu unutar svojih radnih područja. Tlak pumpe je uglavnom manji nego kod konvencionalnog bušenja zbog velikog promjera bušaćeg niza i manje brzine protoka. Hidraulički parametri potrebni za izradu bušotine na polju Eldfisk trebaju uravnotežiti s jedne strane ekvivalentnu cirkulacijsku gustoću isplake u malom prstenastom prostoru između stijenki zaštitnih cijevi i bušotine s vrijednosti

potrebne brzine isplake za pokretanje dubinskog motora s druge strane. Cilj je bio odabrati isplaku koja će davati vrijednosti ekvivalentne gustoće cirkulirajuće isplake slične onima kod konvencionalnog bušenja. Simulacije su izrađene primjenom računalnog programa kako bi se odredila potrebna reološka svojstva isplake za pojedine promjere zaštitnih cijevi odabrane su određene gustoće isplake i protoci koji su rezultirali različitim brzinama protoka. Konačna izvedba isplake davala je vrijednosti brzine 1,27 m/s u prstenastom prostoru slične onima kod primjene bušaćih šipki te dobavu od 0,025 m^3/s za zaštitne cijevi promjera 0,273 m (10 ¾") pri gustoći isplake od 1378 kg/m^3 odnosno dobavu od 0,015 m^3/s za zaštitne cijevi promjera 0,1968 m (7 ¾") pri gustoći isplake od 1713 kg/m^3. Isplaka na bazi ulja s usitnjenim baritom je odabrana za bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi na temelju rezultata hidrauličkih simulacija koje su pokazale da bi obična isplaka na bazi ulja davala vrijednosti ekvivalentne gustoće cirkulacijske isplake iznad gradijenta frakturiranja za obije razmatrane dionice bušotine (Bourassa et al., 2008).

4.7. Odabir dlijeta

Dlijeto je odabrano na temelju podataka dobivenih prethodnih konvencionalnim bušenjem i na temelju podataka o vibracijama dobivenim tijekom ranije spomenutih testiranja. U obzir je uzeta dubina prodora reznog elementa u stijenu i brzina rotacije dobivena kombinacijom rotacije zaštitnih cijevi i uronjenog motora. Za izradu kanala bušotine za ugradnju zaštitnih cijevi promjera 0,273 m (10 ¾") odabrano je PDC dlijeto sa 6 elemenata za razrušavanje koje sadrži rezne elemente veličine 13 mm, dok je za izradu kanala bušotine za ugradnju zaštitnih cijevi promjera 0,1968 m (7 ¾") odabrano PDC dlijeto sa 7 elemenata za razrušavanje koje sadrži rezne elemente veličine 13 mm. Bušotina je izrađena s pilot-dlijetom i proširivačem koji su međusobno udaljeni 20 m i koji rotiraju jednakom brzinom. Osno opterećenje je različito raspoređeno na proširivač i dlijeto tako da svaki element niza buši jednakom mehaničkom brzinom bušenja. Poželjno je također da se veći dio osnog opterećenja prenese na dlijeto kako bi se smanjila torzija (Bourassa et al, 2008).

4.8. Sustav alatki na dnu i sustav za mjerenje tijekom bušenja

Standardni sklop alatki na dnu (slika 4-5) korišten za izradu ove usmjerene bušotine sastojao se od:

- dlijeta,
- upravljivog sustava,
- sustava za mjerenje tijekom bušenja,
- alatke za održavanje promjera kanala bušotine sa šest žrvnjeva;
- proširivača,
- dubinskog motora,
- sklopa za zabravljivanje.

Alatke koje se nalaze ispod proširivača se mogu koristiti i kod konvencionalnog bušenja. Proširivač se sastoji od tri „ruke“ s umetnutim polikristalinskim reznim dijelovima veličine 19 mm posebno razvijenim za izradu bušotina uz primjenu kolone zaštitnih cijevi. Sklop za zabravljivanje služi za spajanje konvencionalnih bušaćih alatki na donji kraj zaštitnih cijevi, odsjednut je u profiliranoj spojnici i prenosi torzijsko, osno i tlačno opterećenje sa sklopa alatki na dnu na zaštitne cijevi. Također omogućuje manipulaciju alatkama uz primjenu opreme na žici i skretanje toka isplake kod manipulacije alatkama, pri čemu isplaka protječe oko sklopa alatki na dnu bez protoka kroz motor i dlijeto. Većina ukupne rotacije dlijeta i proširivača ostvarena je dubinskim isplačnim motorom, dok je rotacija zaštitnih cijevi vršnim pogonom ograničena zbog mogućeg zamora materijala zaštitih cijevi tijekom rotacije kroz nagle promjene zakrivljenosti kanala bušotine. Zaštitne cijevi su rotirane s 20 do 30 okretaja u minuti dok je motor ostvarivao dodatnih 130 okretaja u minuti. Smještanjem sustava za mjerenje tijekom bušenja ispod motora, što zahtjeva gašenje isplačnih pumpi tijekom provođenja ispitivanja. Nemagnetske bušaće šipke nisu postavljene iznad sustava za mjerenje tijekom bušenja, a korekcije zbog utjecaja magnetizma alatki obavljane su matematički uz ispitivanja žiroskopom na kraju svake dionice kako bi se potvrdila preciznost poduzetih korektivnih mjera. Također u niz bušaćih alatki ugrađena su dva prijelazna komada za registriranje vibracija čiji podatci će se koristiti kod analize bušenja i budućih radova (Bourassa et al., 2008).

Slika 4-5. Korišteni sklop alatki na dnu za izradu usmjerene bušotine B-16A (Bourassa et al., 2008)

4.9. Kontrola tlaka u bušotini

Primjena zaštitnih cijevi za izradu bušotine pruža nekoliko prednosti pri kontroli tlaka u bušotini u odnosu na konvencionalno bušenje:

- nema planiranih manevriranja bušaćim alatkama, što eliminira potencijalno klipovanje;
- veća vrijednost ekvivalentne cirkulacijske gustoće isplake umanjuje mogućnost dotoka tijekom bušenja, što znači da će do dotoka doći najvjerojatnije tijekom dodavanja zaštitnih cijevi. Na tržištu postoji različito komercijalno dostupna oprema za otkrivanje dotoka tijekom dodavanja zaštitnih cijevi;
- bušotinu se može konstantno cirkulirati tijekom manevriranja alatkama uz pomoć opreme na žici, što eliminira dotok fluida i u velikoj mjeri smanjuje mogućnost klipovanja tijekom izvlačenja sklopa alatki na dnu;
- protuerupcijski uređaj može biti opremljen čeljustima za zaštitne cijevi.

Kontrola tlaka u bušotini kod bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi vrlo je slična onoj kod bušotina malog promjera (engl. slim-hole). Rano otkrivanje dotoka i smanjenje volumena dotoka su ključni za uspješno gušenje bušotine. Volumen bušaćeg niza je u većini slučajeva veći od volumena prstenastog prostora, zbog toga je bušaća metoda prvi izbor kod gušenja bušotine. U razmatranje može doći metoda „Dynamic Kill“ nakon iscirkuliravanja dotoka, dok metodu „Wait and Weight“ nije moguće primijeniti zbog toga što će dotok vrlo vjerojatno doći do ušća bušotine prije nego što otežana isplaka stigne do dlijeta. Zbog većih vrijednosti trenja u prstenastom prostoru, dobava pri smanjenom broju hodova određena je za 10, 20, 30 i 40 hodova po minuti i to prilikom bušenja i nakon otključavanja sklopa za zabravljivanje neposredno prije vađenja sklopa alatki na dnu. Tlak uslijed smanjene dobave kod zabravljenog BHA ima znatno drugačije vrijednosti nego što je to kod odbravljenog. Kod odbravljenog BHA isplaka ne cirkulira kroz BHA već zaobilazi sve komponente. Dva ventila nalaze se unutar BHA, jedan iznad upravljivog sustava, a drugi iznad motora, te sprječavaju utok fluida u bušaći niz dok je BHA zabravljen (Bourassa et al., 2008).

4.10. Bušenje usmjerene bušotine pomoću zaštitnih cijevi promjera 0,273 m (10 ¾")

Za izradu dionice bušotine sa zaštitnim cijevima 0,273 m (10 ¾") korištena su dva različita sklopa alatki na dnu. Nakon spuštanja zaštitnih cijevi do dubine 255 m sastavljen je BHA i žicom spušten na dno niza. Sastav alatki na dnu sastojao se od:

- dlijeta promjera 0,2413 m (9 ½"),
- dubinskog motora,
- proširivača na peti zaštitnih cijevi promjera 0,1362 m (12 3/4") (*engl. casing reamer shoe*).

Bušenje je započelo na mjerenoj duljini kanala od 331 m kroz cementacijsku petu do 361 m. BHA je pomoću opreme na žici izvučen na površinu i sastavljen je drugi sklop alatki za usmjereno bušenje, koji uključuje proširivač promjera 0,3238 m (12 ¾"), koji je smješten na udaljenost od 2 m ispod proširivača na peti zaštitnih cijevi. Započelo je usmjereno bušenje, te su tijekom bušenja obavljena četiri mjerenja žiroskopom na žici od 361 m do 741 m mjerene duljine kanala bušotine zbog magnetskih smetnji. Tijekom mjerenja nije bilo kretanja zaštitnih cijevi i cirkulacije u bušotini. Žiroskop je spuštan pomoću alatke žici i za mjerenje je bilo potrebno od 4 do 6 sati. Od 741 m do 1513 m održani su relativno konstantni parametri bušenja: mehanička brzina bušenja od 15,2 m/h, rotacija zaštitnih cijevi od 20 okretaja po minuti i dobava od 0,025 m^3/s. Tlak pumpe iznosio je 9 652 660 Pa dok se torzija postepeno povećavala do 10304 Nm. Otklon kanala bušotine povećan je sa 7° na 21°. Tijekom bušenja nisu obavljana mjerenje tlaka u prstenastom prostoru no hidrauličke simulacije ukazivale su na ekvivalentnu cirkulacijsku gustoću isplake od 1473 kg/m^3 za gustoću isplake od 1342 kg/m^3. Gustoća isplake od 1342 kg/m^3 zadržana je do konačne dubine kada je povećana na 1366 kg/m^3 prema bušaćoj praksi iz prethodno konvencionalno izrađenih bušotina na polju Eldfisk. Nakon završetka bušenja, sklop alatki na dnu izvučen je alatkom na žici, a u bušotinu je spušten cementacijski protupovratni ventil. Protupovratni ventil odsjednut je u profiliranu spojnicu na mjestu gdje je prethodno bio odsjednut sklop za zabravljivanje. Uloga protupovratnog ventila je nasjedanje gornjeg i donjeg čepa te zadržavanje povratnog tlaka kod cementacije. Nakon protiskivanja cementne kaše u bušotinu nije došlo do nasjedanja gornjeg čepa niti je protupovratni ventil izdržao povratni tlak uslijed razlika u gustoći cementne kaše i isplake korištene tijekom

cementacije. Rezultat toga je produljenje od nekoliko sati zbog čekanja na vezivanje cementne kaše (Bourassa et al., 2008).

4.11. Bušenje usmjerene bušotine pomoću zaštitnih cijevi promjera 0,1968 m (7 ¾")

Zaštitne cijevi promjera 0,1968 m (7 ¾") spuštene su neposredno iznad cementnog čepa unutar prethodnog niza zaštitnih cijevi, isplaka je zamijenjena isplakom gustoće 1701 kg/m^3 te je spušten sklop alatki za bušenje. Prilikom bušenja protupovratnog ventila došlo je do gubitka 25 m^3 isplake. Nakon provođenja ispitivanja integriteta (engl. Formation integrity test) bušotine nastavljeno je daljnje bušene sklopom za usmjereno bušenje. Tijekom sljedećih četrnaest dana došlo je do različitih problema sa sklopom alatki na dnu i s opremom za bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi, što je rezultiralo značajnim produljenjem planiranog vremena za bušenje ove dionice. U tom periodu izbušeno je samo 140 m. U nastavku su kratko opisani uočeni problemi:

- sklop za zabravljivanje nije u potpunosti odsjednut u profiliranoj spojnici te je bilo potrebno vađenje i ponovno spuštanje dubinskog bušaćeg sklopa;
- znatno veći tlak cirkulacije od očekivanog i problemi s upravljivim sustavom, te je bilo potrebno vađenje alatki opremom na žici te površinsko testiranje kako bi se utvrdio uzrok problema;
- kvar upravljivog sustava što je uzrokovalo ne mogućnost vađenja BHA opremom na žici odnosno vađenje je obavljeno nizom bušaćih šipki;
- zastoj motora što je također zahtijevalo vađenje BHA opremom na žici;
- kvar sustava za mjerenje tijekom bušenja te ponovno vađenje BHA opremom na žici.

Nakon spuštanja BHA bušenje je nastavljeno sljedećih devet dana od 1650 m do 3100 m. Na dubini od 2220 m postavljene su dvije vješalice lajnera i mehanička alatka za oslobađanje. Bušenje je nastavljeno uz smanjenu gustoću isplake od 1689 kg/m^3. Na dubini od 3100 m došlo je do iznenadnog pada tlaka na pumpama, nakon čega je sklop alatki na dnu oslobođen i izvučen na površinu. Pregledom alatki na površini utvrđeno je da su brtve alatke za zabravljivanje bile istrošene zbog ne kompatibilnosti s isplakom. Tom prigodom zamijenjeno je i dlijeto i BHA te je bušenje nastavljeno do dubine od 3600 m mjerene

duljine kanala bušotine. Na toj dubini zamijenjen je BHA, pri čemu su upravljivi sustavi i alatka za karotažu tijekom bušenja smješteni bliže dlijetu kako bi se točnije odredila dubina ugradnje zaštitnih cijevi. Bušenje je nastavljeno do dubine od 3645 m gdje je došlo do otkazivanja senzora gama zraka, što je riješeno vađenjem na površinu i zamjenom, te je bušenje nastavljeno do konačne dubine od 3695 m. Unatoč svim neočekivanim problemima (tablica 4-1) svi zadani ciljevi kod bušenja sa zaštitnim cijevima promjera 0,1968 m (7 ¾") su ispunjeni. Otklon kanala bušotine povećan je s 21° na 69° (Bourassa et al., 2008).

Tablica 4-1. Detaljan prikaz različitih problema uviđenih tijekom bušenja zaštitnim cijevima promjera 0,1968 m (7 ¾") (Bourassa et al., 2008)

BHA promjer m, (")	Mjerena duljina kanala bušotine (m)	Razlog vađenja	Uspješnost vađenja na žici	Vrijeme potrebno za vađenje (h)
0,273 (10 ¾)	360	Planirano vađenje	Da	0,5
0,273 (10 ¾)	1510	Kraj sekcije	Da	1,5
0,196 (7 ¾)	1520	Planirano vađenje	Da	2,25
0,196 (7 ¾)	1540	Visoki tlak i zatajenje RSS	Da	1,25
0,196 (7 ¾)	1600	Zatajenje RSS	Ne	6
0,196 (7 ¾)	1610	Zatajenje motora	Da	2
0,196 (7 ¾)	1650	Zatajenje MWD	Da	1,75
0,196 (7 ¾)	3100	Istrošenost brtvi na sklopu za zabravljivanje	Da	2,5
0,196 (7 ¾)	3600	Planirano vađenje	Da	3,5
0,196 (7 ¾)	3645	Zatajenje alatke za karotažu	Da	3,75
0,196 (7 ¾)	3695	Kraj dionice	Ne	11,25

4.12. Analiza primijenjene tehnologije usmjerenog bušenja uz primjenu kolone zaštitnih cijevi na polju Eldfisk

Problemi koji se javljaju tijekom bušenja uz primjenu kolone zaštitnih cijevi većinom su različiti u odnosu na bušenje konvencionalnog niza bušaćih alatki. Veliki broj tih problema uzrokovan je: znatno manjim prstenastim prostorom između stijenke bušotine i vanjske stijenke zaštitnih cijevi, velikim unutrašnjim promjerom bušaćeg niza, ograničenim promjerom alatki na dnu zbog mogućnosti prolaska kroz zaštitne cijevi i zbog činjenice da je većina bušaćeg niza puno veća no što je to kod konvencionalnog niza bušaćih alatki. Neki od tih problema koji su zapaženi pri izradi bušotine B-16A biti će detaljnije opisani u nastavku.

Torzija i nateg

Vrijednosti torzije i vlačne sile tijekom bušenja bile su u skladu sa simulacijama prije izrade same bušotine. Kod izrade početnog dijela dionice promjerom zaštitnih cijevi 0,1968 m (7 ¾") zabilježen je faktor trenja 0,18. Na dubini od 2987 m došlo je do opadanja faktora trenja i najniža zabilježena vrijednost iznosila je 0,15 prije ponovnog povećanja kako se izrada bušotine bližila kraju. Promjena faktora trenja nije utjecala na promjenu ekvivalentne cirkulacijske gustoće isplake niti na sposobnost isplake da čisti dno bušotine.

Diferencijalni tlak na motoru

Diferencijalni tlak na motoru je vrlo rijetko prelazio 1378950 Pa što odgovara vrijednosti od 2169 Nm okretnog momenta za sklop alatki na dnu za usmjereno bušenje što uključuje proširivač i dlijeto. Upotrebljavani motor može ostvariti protok i kod tlaka od 5171067 Pa što odgovara okretnom momentu od 7592 Nm. Diferencijalni tlak je održavan niskim zbog održavanja konstantne brzine bušenja od 15,2 m/h te zbog činjenice da je relativno nizak diferencijalni tlak potreban bi se zadržao ovakav napredak dlijeta. Kod bušenja na 1995 m mjerene duljine kanala bušotine postignuta je brzina bušenja od 27,43 m/h s diferencijalnim tlakom motora od samo 551 580 Pa uz brzinu rotacije zaštitnih cijevi od 28 okretaja u minuti. Nešto veće vrijednosti diferencijalnog tlaka ostvarene su pri izradi ostalih dijelova kanala bušotine, no u svim slučajevima diferencijalni tlak je bio relativno nizak u odnosu na potencijal motora. Cjelokupno gledano motor je pružao dovoljnu snagu

za pogon proširivača i dlijeta, za željeni napredak dlijeta gdje je u razmatranje uzeto i čišćenje dna bušotine i vrijednosti ekvivalentne cirkulacijske gustoće isplake. Motor može nesmetano raditi i kod dobave od 605 dm^3/min ako je potrebno kod slučaja gubitka cirkulacije.

Zastoji dubinskog motora

Tijekom bušenja dionica kanala bušotine zaštitnim cijevima promjera 0,273 m (10 ¾") i 0,1968 m (7 ¾") zabilježeno je svega nekoliko zastoja motora. Što je pomalo neobično zbog toga što postoji dokazana veza između tlaka u zaštitnim cijevima i produljenja zaštitnih cijevi sa zastojima dubinskih motora. Bilo kakav poremećaj koji uzrokuje porast tlaka unutar zaštitnih cijevi prouzročit će i produljenje zaštitnih cijevi. Takvo produljenje uzrokuje povećanje opterećenja na dlijeto i opterećenja motora što uzrokuje povećanje tlaka u zaštitnim cijevima, a što dalje dodatno povećava opterećenje dubinskog motora. Takav fenomen se češće javlja kod bušenja sa zaštitnim cijevima nego kod konvencionalnog bušenja zbog većeg unutrašnjeg promjera koji uzrokuje puno veće produljenje za određeno povećanje tlaka unutar zaštitnih cijevi. Kod bušenja na relativno maloj dubini sa zaštitnim cijevima promjera 0,273 m (10 ¾") došlo je do povećanja opterećenja na motor najvjerojatnije zbog prestanka rotacije vršnog pogona. Istovremeno došlo je do povećanja opterećenja na dlijeto s 1814 kg na 13607 kg, a vrijednost torzije dosegnula je 21693 Nm. Sve ove brojke su u skladu s prethodno izrađenim modelom odnosa tlaka i produljenja niza zaštitnih cijevi. Pri izradi kanala bušotine sa zaštitnim cijevima promjera 0,1968 m (7 ¾") došlo je do samo jednog zastoja motora, iako je model odnosa tlaka i produljenja niza zaštitnih cijevi ukazuje na to da može doći do većih problema. Za to je u velikoj mjeri zaslužna činjenica da je motor upotrebljavan u malom rasponu snage u odnosu na maksimalnu moguću snagu te da su formacije bile bušive.

Opterećenje na dlijeto

Obije dionice kanala bušotine izrađene su s relativno malim opterećenjem na dlijeto iako su proširivač i dlijeto korišteni istovremeno. Očigledno je da je dlijeto dobro odabrano za rad u paru s proširivačem. Slika 4-6 prikazuje rezne elemente na proširivaču na kojima nema traga istrošenosti nakon bušenja dionice duljine 1440 m koja predstavlja najdužu dionicu izrađenu pri jednom spuštanju alatki u razmatranu bušotinu.

Slika 4-6. Rezni elementi proširivača nakon upotrebe tijekom bušenja dionice kanala bušotine B-16A (Bourassa et al., 2008)

Vrijeme potrebno za dodavanje

Jedna od očitih ne efikasnosti tijekom izrade bušotine pomoću niza zaštitnih cijevi je ta, da je vrijeme potrebno za dodavanje svake nove zaštitne cijevi u prosjeku trebalo više od 30 min. Oko 6 min od navedenog vremena potrošeno je na zadizanje niza zaštitnih cijevi i odsjedanje unutar klinova. Zaštitne cijevi su se nalazile unutar klinova 12 minuta, tijekom kojeg je izvršeno odspajanje sklopa za spajanje na vršni pogon, uvlačenje nove zaštitne cijevi u toranj bušaćeg postrojenja te spajanje s nizom zaštitnih cijevi. Dodatnih 11 minuta potrebno je za pregled i spuštanje dlijeta na dno bušotine te primjenu definiranih parametara bušenja. U budućnosti se predviđa smanjenje prosječnog vremena potrebnog za dodavanje nove zaštitne cijevi na približno 15 minuta.

Vibracije

Bušaći niz kod bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi znatno je dulji u odnosu na sklop alatki na dnu, nego što je to kod konvencionalnih alatki. Takav odnos duljina alatki dovodi do snažnih vibracija u području sklopa alatki na dnu čak i kod vrlo male nestabilnosti bušaćeg niza. Uz to proširivač i dlijeto pridonose vibracijama u području sklopa alatki na dnu. Testiranja u prethodno izrađenim bušotinama ukazala su na dvije metode za smanjenje vibracija a to su:

- stabiliziranje motora sa stabilizatorom koji se postavlja unutar niza iznad pete kolone;
- upotreba proširivača sa žrvnjevima neposredno ispod proširivača za stabiliziranje i smanjivanje vibracija koje se prenose na sklop alatki na dnu.

Provjera operacija

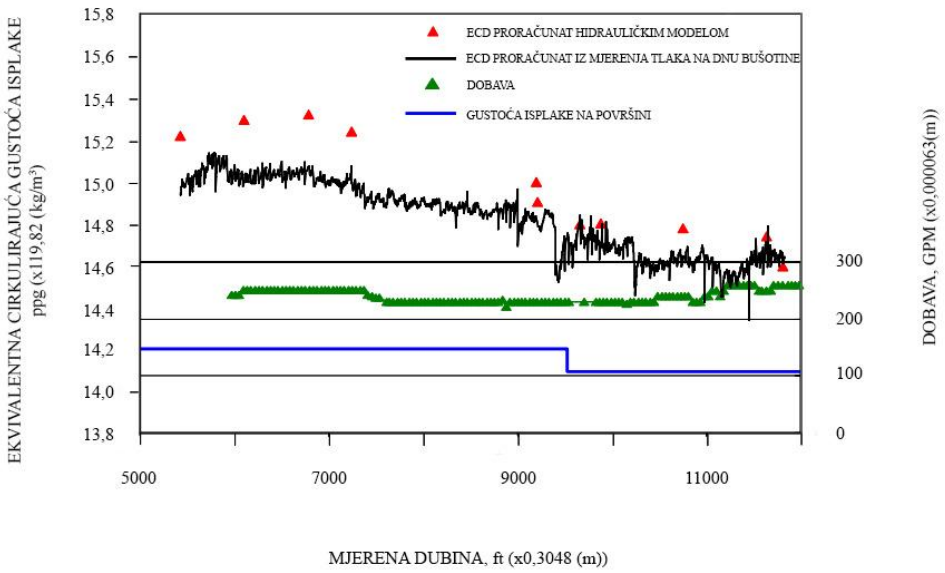
Tri vrste mjerenja i kalkulacija obavljena su tijekom izrade kanala bušotine kako bi se provjerila stabilnost i čišćenje kanala bušotine a to su:

a) hidrauličko podizanje zaštitnih cijevi (*engl.hydraulic lift*);
b) promatranje ekvivalentne gustoće cirkulirajuće isplake;
c) test zadizanja i spuštanja radi provjere težine (*engl. pick up/slack-off test*).

a) Fluid koji struji u prstenastom prostoru između stijenke zaštitnih cijevi i stijenke kanala bušotine ostvaruje hidrauličku silu podizanja na niz zaštitnih cijevi koja je direktno proporcionalna smanjenju tlaka u prstenastom prostoru. Ovaj efekt javlja se i kod bušenja s konvencionalnim nizom alatki no on je u tom slučaju zanemariv. Jedan način za određivanje sile podizanja niza zaštitnih cijevi je promatranje razlike između opterećenja na kuki tijekom rotacije i s isključenim pumpama i opterećenja tijekom rotacije s uključenim pumpama, kod svakog dodavanja zaštitne cijevi.

b) Ekvivalentna cirkulacijska gustoća isplake zabilježena tijekom bušenja dionice kanala bušotine zaštitnim cijevima promjera 0,1968 m (7 ¾") prikazan je na (slika 4-7). Gustoća isplake održavana je relativno konstantnom na vrijednosti od 1700 kg/m^3 sve do dubine od 2926 m na kojoj je došlo do smanjenja gustoće za 12 kg/m^3. Dobava je varirala od 0,014 m^3/s do 0,016 m^3/s. Trend smanjenja ekvivalentne gustoće cirkulirajuće isplake je

primarno povezan s razrjeđivanjem isplake kako se temperatura na dnu bušotine linearno povećavala s 40 °C na dubini od 1524 m do 95 °C na konačnoj dubini kanala bušotine.



Slika 4-7. Ekvivalentna gustoća cirkulirajuće isplake (Bourassa et al., 2008)

c) Na temelju iskustva tijekom bušenja pomoću zaštitnih cijevi razvijena je praksa zaustavljanja rotacije bušaćeg niza prije dodavanja zaštitne cijevi koja definira kada bušač zadiže niz te kada ga spušta kako bi se ustanovila težina niza u oba slučaja. Nakon dodavanja rotacija se nastavlja te se također zabilježi težina niza. Ovakav postupak čini „pick up/slack-off“ test za kontrolu prethodno proračunatog natega kod analize torzije i natega tijekom bušenja. Povećanje težine niza nakon zadizanja te mala vrijednost težine niza nakon spuštanja niza ukazuje na povećani nateg unutar kanala bušotine. Ovakvi testovi obavljeni su kod većine dodavanja zaštitnih cijevi tijekom izrade kanala bušotine zaštitnim cijevima promjera 0,1968 m (7 ¾"). Analiza ukazuje na mala odstupanja od prethodno proračunatih vrijednosti, što ukazuje na činjenicu da je zadržano efikasno čišćenje kanala bušotine te njegova stabilnost (Bourassa et al., 2008).

5. ZAKLJUČAK

Usmjereno bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi pokazalo se kao praktična alternativa konvencionalnom bušenju i zacijevljivanju bušotine kao odvojenom procesu. Kod upotrebe zaštitnih cijevi većih promjera nema smanjenja efikasnosti bušenja uz primjenu upravljivog dubinskog motora i/ili upravljivog sustava. Ta činjenica je omogućila korištenje prednosti bržeg spuštanja i izvlačenja alatki i izbjegavanje različitih problema prilikom izrade bušotine. Upravljivi dubinski motor može biti korišten kod promjera bušotina 0,2159 m (8 ½") i većim, no znatno su efikasniji kod korištenja s promjerom 0,3115 m (12 ¼") i većim. Upravljivi sustav najefikasniji je kod manjih promjera bušotine od 0,2159 m (8 ½") do 0,2508 m (9 7/8"). Bušenje na polju Eldfisk pokazalo je mogućnost izrade bušotina uz primjenu zaštitnih cijevi i na odobalnim postrojenjima. Iskustvo i tehnologija u primjeni usmjerenog bušenja sve više napreduje te se predviđa sve veća upotreba ove tehnologije.

6. LITERATURA

1. Bourassa, K., Husby, T., Watts, R., Oveson, D., Warren, T., Bjoerneli, H., Sunde, F., (2008): A Case History of Casing Directional Drilling in The Norwegian Sector of The North Sea, paper SPE 112560, presented at SPE/IADC, Orlando, Florida, U.S.A. 4-6 March 2008.

2. Fontenot, K., Lesso, B., Sticker, R. D., Warren, T., (2005): Using Casing to Drill Directional Wells

3. Šolić, L. (2005): Bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi, Diplomski rad, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

4. Warren, T., Houtchens, B., Madell, G., (2003): Directional Drilling With Casing, paper SPE 79914, presented at SPE/IADC, Amsterdam, The Netherlands, 19-21 February 2003.

5. Warren, T., Johns, R., Zipse, D., (2006): Top-Drive Casing-Running Procesess Improves Safety and Capability, paper SPE 92579, presented at SPE/IADC, Amsterdam, The Netherlands, 23-25 February 2006.

6. Warren, T., Lesso, B., (2005): Casing Drilling Directional Wells, paper OTC 17453, presented at OTC, Huston, TX, U.S.A, 2-5 May 2005.

7. BIZERCH Vršni pogon.

URL: http://www.bizearch.com/products/Top_drive_system_10003_19969.htm (10.9.2015.)

8. OILRIG- PHOTOS Platforma Eldfisk Bravo.

URL: http://www.oilrig-photos.com/picture/number265.asp (6.11.2015.)

9. TENARIS, Tenaris Blue spojnica zaštitnih cijevi.

URL: http://www.tenaris.com/en/products/premiumconnections.aspx (9.11.2015.)