Bušenje uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine i "Mud Cap" metoda kao varijante bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka

Južnić, Andrea

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:169:960512

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

BUŠENJE UZ ODRŽAVANJE STALNOG TLAKA NA DNO BUŠOTINE I „MUD CAP“ METODA KAO VARIJANTE BUŠENJA U UVJETIMA KONTROLIRANOG TLAKA

Diplomski rad

Andrea Južnić

N296

Zagreb, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

BUŠENJE UZ ODRŽAVANJE STALNOG TLAKA NA DNO BUŠOTINE I „MUD CAP“ METODA KAO VARIJANTE BUŠENJA U UVJETIMA KONTROLIRANOG TLAKA

Andrea Južnić

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

Sažetak

Predmet istraživanja ovog diplomskog rada su dvije različite metode bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka: bušenje uz održavanje stalnog tlaka na dno i „Mud Cap“ metoda bušenja. Potreba za ovakvim metodama bušenja javlja se sve češće, zbog izrade bušotina u dosad tehnološki nedostižnim uvjetima dubine, temperature i tlaka, a uz mogućnost iskorištavanja novih ležišta bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka dovodi i do povećanja sigurnosti okoliša, ali i ljudi na bušaćim postrojenjima. Rad opisuje teoretsku podlogu dviju spomenutih metoda bušenja, opremu i njihovu primjenu u različitim slučajevima gdje izrada bušotine konvencionalnim bušenjem nije bila moguća zbog nekontroliranih gubitaka isplake ili pak premalog intervala između gradijenata slojnog tlaka i tlaka frakturiranja naslaga.

Ključne riječi: bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka, „Mud Cap“ metoda bušenja, bušenje uz održavanje stalnog tlaka na dno, nekonvencionalne metode bušenja

Diplomski rad sadrži: 75 stranica, 25 slika, 1 tablice i 33 izvora.

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Mentor: doc. dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a

Ocjenjivači: doc. dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a
prof. dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNF-a
prof. dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF-a

Datum obrane: 17. siječnja 2020.

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Master's Thesis

CONSTANT BOTTOM HOLE PRESSURE DRILLING AND "MUD CAP" DRILLING AS VARIANTS OF MANAGED PRESSURE DRILLING

Andrea Južnić

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

Abstract

The subject of this thesis are the two main methods of managed pressure drilling (MPD): the Constant Bottomhole Pressure and the "Mud Cap" Drilling method. Lately, these unconventional methods have become more frequently used than ever due to greater than ever depth, pressure and temperature conditions of reservoirs. The other advantages of managed pressure drilling are enhanced safety of people on board of drilling structures, as well as environmental protection. The thesis explains the theoretical background of the two methods, necessary equipment and several case studies of MPD use for different types of wells where conventional drilling method proved unsuccessful due to uncontrollable drilling fluid losses or too small a difference between pore pressure and fraction pressure gradient.

Keywords: Managed pressure drilling, Constant bottom hole pressure, "Mud Cap" drilling, unconventional drilling methods

Thesis contains: 75 pages, 25 figures, 1 table and 33 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited at the Library of the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Supervisor: Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

Reviewers: Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD
Full Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD
Full Professor Zdenko Krištafor, PhD

Date of defense: January 17th, 2020

SADRŽAJ

POPIS SLIKA ..... **i**

POPIS TABLICA ..... **iii**

POPIS KRATICA ..... **iv**

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH MJERNIH JEDINICA ... **vii**

1. UVOD **1**

2. BUŠENJE U UVJETIMA KONTROLIRANOG TLAKA **2**

2.1. Varijante bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka **3**

2.2. Potrebna oprema za bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka **5**

2.2.1. Rotirajuća bušaća glava (RCD) 5

2.2.2. Protupovratni ventili 7

2.2.3. Sapnica 7

3. MPD METODA BUŠENJA UZ ODRŽAVANJE STALNOG TLAKA NA DNO BUŠOTINE **9**

3.1. Postupak proračuna potrebne gustoće isplake i vrijednosti protutlaka . **11**

3.2. Podjela metoda bušenja s održavanjem stalnog tlaka na dno **12**

4. METODA NEPREKINUTE CIRKULACIJE ISPLAKE **13**

4.1. Spojnica za neprekinutu cirkulaciju isplake **15**

4.2. Prijelaz za neprekinuti protok isplake **18**

5. METODA ODRŽAVANJA STALNOG TLAKA NA DNO OSTVARIVANJEM PROTUTLAKA NA UŠĆU BUŠOTINE **19**

5.1. Ostvarivanje protutlaka upotrebom sisaljke **19**

5.2. Ostvarivanje protutlaka pomoću podesive sapnice **20**

5.3. Sustav za kontrolu dinamičkog tlaka u prstenastom prostoru (DAPC) .. **21**

5.3.1. DAPC razdjelnik podesive sapnice 24

5.3.2. Sisaljka za ostvarivanje protutlaka u DAPC sustavu 25

5.3.3. Integrirani sustav za kontrolu tlaka 26

6. PRIMJENA MPD METODE ODRŽAVANJA STALNOG TLAKA NA DNO BUŠOTINE U PRAKSI 27

6.1. Izrada istražne bušotine BTE-2 u Egiptu 27

6.2. Izrada bušotina Bien Dong 2 i 3 u HPHT uvjetima 32

6.3. Metoda bušenja uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine uz korištenje isplake plinizirane dušikom 37

7. „MUD CAP“ METODA BUŠENJA 40

7.1. Bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu statičkog fluida u prstenastom prostoru (engl. *FMCD – Floating Mud Cap Drilling*) 40

7.2. Bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu dodatnog tlaka na statički fluid u prstenastom prostoru (engl. PMCD – *Pressurized Mud Cap Drilling*) 42

7.2.1. Primjer proračuna tlakova i gustoća za potrebe izrade kanala bušotine korištenjem FMCD i PMCD metode 46

7.2.1.1. Proračun tlakova i gustoća fluida za primjenu kod FMCD metode bušenja 46

7.2.1.2. Proračun tlakova i gustoća fluida za primjenu kod PMCD metode bušenja 48

7.2.2. Oprema za PMCD 49

7.3. Metoda bušenja u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz konstantno utiskivanje fluida u bušaći niz (engl. *DMCD – Dynamic Mud Cap Drilling*) 52

7.4. Bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz povećanu kontrolu parametara (engl. *CMC - Controlled Mud Cap*) 55

7.5. Kriteriji za odabir pojedine „Mud Cap“ metode bušenja 58

7.5.1. Sigurnost 58

7.5.2. Ekonomičnost 58

7.5.3. Logistika 59

7.6. Ograničenja primjene „Mud Cap“ metoda 59

8. PRIMJENA „MUD CAP“ BUŠENJA U PRAKSI 61

8.1. Primjena PMCD kod izrade re-entry bušotine u Saudijskoj Arabiji 61

8.2. Primjena PMCD pri bušenju HPHT bušotine u Abu Dhabiju 67

9. ZAKLJUČAK 71

10. LITERATURA 72

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Weatherford Safeshield rotirajuća bušaća glava za bušaće radove na kopnu 6
Slika 2-2. Weatherford SeaShield rotirajuća bušaća glava za bušaće radove u odobalju 6
Slika 2-3. Hidrostatski aktiviran protupovratni ventil 7
Slika 2-4. Daljinski upravljana sapnica SuperChoke kompanije MI Swaco 8
Slika 2-5. M-I Swaco SuperChoke tri položaja zapornog elementa tipa ploče s unaprijed urezanim otvorima..... 8
Slika 4-1. Razdjelnik (usmjerivač) toka isplake kao dio e-cd sustava kompanije ENI 15
Slika 4-2. Prikaz procesa spajanja ili odpajanja bušaće šipke uz primjenu spojnice za neprekinutu cirkulaciju..... 17
Slika 4-3. Prijelaz za ostvarivanje neprekinute cirkulacije isplake tijekom dodavanja bušaćih šipki 18
Slika 5-1. Shema sustava za bušenje uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine uz primjenu sisaljki za protutlak..... 20
Slika 5-2. Shema DAPC sustava..... 23
Slika 5-3. Automatizirani razdjelnik podesive sapnice 25
Slika 5-4. Sisaljka za protutlak 26
Slika 6-1. Odnos gradijenata tlaka frakturiranja i slojnog tlaka (određen poslije bušenja)..... 31
Slika 6-2. Realizirani vremenski raspored radova na izradi bušotine BD-1..... 35
Slika 6-3. Usporedba vremena potrebnog za izradu kanala bušotine promjera 0,3112 m na bušotinama BD-2 i BD-3..... 36
Slika 7-1. Usporedba promjene slojnog tlaka i tlaka stupca isplaka različitih gustoća kod PMCD-a 43
Slika 7-2. Usporedba promjene slojnog tlaka i tlaka stupca isplaka različitih gustoća kod PMCD-a uz primjenu tlaka na prstenasti prostor na ušću bušotine 44
Slika 7-3. Pojednostavljena ilustracija djelovanja PMCD metode bušenja..... 45
Slika 7-4. Preventerski sklop koji se koristi na bušaćem postrojenju kod primjene PMCD metode bušenja..... 50
Slika 7-5. Varijanta DMCD s dva niza zaštitnih cijevi i lajnerom 54
Slika 7-6. Shema opreme za kontrolirani „Mud Cap“ 57
Slika 8-1. Shema korištene opreme za PMCD na bušotini u Saudijskoj Arabiji..... 65

Slika 8-2. Dio grafa prikazuje zabilježene vrijednosti tlakova i protoka isplake tijekom opisanog re-entry bušenja u Saudijskoj Arabiji 66
Slika 8-3. Vrijeme utrošeno na konvencionalno bušenje prije prelaska na „Mud Cap“ metodu bušenja..... 68
Slika 8-4. Dinamički gubici tijekom bušenja „Mud Cap“ metodom na polju u Abu Dhabiju 70

POPIS TABLICA

Tablica 7- 1. Vrijednosti slojnog tlaka i odgovarajuće gustoće isplake na razini pojedine frakture 47

POPIS KRATICA

ABP varijanta bušenja uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine primjenom protutlaka na površini (engl. *applied back pressure*)

APWD mjerenje tlaka u prstenastom prostoru tijekom bušenja (engl. *annular pressure while drilling*)

BHA dubinski bušaći sklop (engl. *bottomhole assembly*)

BHP tlak na dnu bušotine (engl. *bottomhole pressure*)

BOP preventer erupcije bušotine (engl. *blowout preventer*)

CBHP bušenje uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine (engl. *Constant Bottomhole Pressure*)

CCC spojnica za neprekinutu cirkulaciju (engl. *continuous circulation coupler*)

CCS sustav za neprekinutu cirkulaciju, jedna od metoda MPD-a za održavanje stalnog tlaka na dno bušotine (engl. *continuous circulation system*)

CCV ventil za neprekinutu cirkulaciju (engl. *continuous circulation valve*)

CMC metoda bušenja bez povratnog toka isplake uz povećanu kontrolu parametara (engl. *Controlled Mud Cap*)

DAPC sustav za kontrolu dinamičkog tlaka u prstenastom prostoru (engl. *DAPC - Dynamic Annular Pressure Control*)

DMCD bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz konstantno utiskivanje fluida u bušaći niz (engl. *Dynamic Mud Cap Drilling*)

DPPT testiranje vrijednosti slojnog tlaka u dinamičkim uvjetima (engl. *dynamic pore pressure test*)

ECD ekvivalentna cirkulacijska gustoća isplake (engl. *equivalent circulating density*)

ESD ekvivalentna statička gustoća isplake (engl. *equivalent static density*)

FMCD bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu statičkog fluida u prstenastom prostoru (engl. *Floating Mud Cap Drilling*)

FPTP obrok fluida s umreženim polimerima čija svojstva ovise o temperaturi i time djeluje tako da gušći fluid ostaje na vrhu bušotine (engl. *fluid pressure transmission pill*)

HPHT uvjeti visokog tlaka i temperature (engl. *high pressure, high temperature*)

HPMCD bušenje „Mud Cap“ metodom u uvjetima visokih slojnih tlakova (engl. *High Pressure Mud Cap Drilling*)

HPU hidraulička pogonska jedinica (engl. *hydraulic power unit*)

HSE skup parametara koji imaju utjecaj na zdravlje i sigurnost osoblja i okoliš (engl. *health, safety, environment*)

IADC Međunarodno udruženje izvođača radova bušenja (engl. *International Association of Drilling Contractors*)

LCM materijali za čepljenje zona gubljenja isplake (engl. *lost circulation materials*)

LWD prikupljanje podataka tijekom bušenja (engl. *logging while drilling*)

MCD metoda bušenja u uvjetima potpunog gubljenja isplake, „Mud Cap“ metoda bušenja (engl. *Mud Cap Drilling*)

MPD bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka (engl. *Managed Pressure Drilling*)

MWD mjerenje tijekom bušenja (engl. *measurement while drilling*)

NMPD metoda bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka uz korištenje isplake plinificirane dušikom (engl. *Nitrified Managed Pressure Drilling*)

NPT neproduktivno vrijeme (engl. *non-productive time*)

NRV protupovratni ventil (engl. *non-return valve*)

PMCD bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu dodatnog tlaka na statički fluid u prstenastom prostoru (engl. *Pressurized Mud Cap Drilling*)

PLC programabilni logički kontroler

PRV ventil za smanjenje tlaka (engl. *pressure relief valve*)

PWD bilježenje podataka o vrijednostima tlakova u kanalu tijekom bušenja (engl. *pressure while drilling*)

RCD rotirajuća bušaća glava (engl. *rotating control device*)

RPD preusmjerivač protoka za usmjeravanje isplake sa stojke i isplačnih sisaljki na razdjelnik (engl. *rig pump diverter*)

RSS rotirajući upravljivi sustav (engl. *rotary steerable system*)

UBO bušenje u uvjetima podtlaka (engl. *underbalanced operations*)

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH MJERNIH JEDINICA

g	ubrzanje sile teže	[m/s^2]
grad	gradijent hidrostatskog tlaka	[Pa/m]
h	dubina krovine sloja	[m]
h_1/h_2	dubina frakture	[m]
p_b	tlak na dnu bušotine	[bar]
p_{dp}	tlak diferencijalnog prihvata alatki	[bar]
p_f	tlak frakturiranja naslaga	[bar]
p_{gub}	tlak gubitka cirkulacije	[bar]
p_h	hidrostatski tlak stupca isplake	[bar]
p_p	slojni tlak	[bar]
p_{pt}	protutlak ostvaren na fluid u prstenastom prostoru s površine	[bar]
Δp_{pp}	pad tlaka u sustavu zbog gubitaka u prstenastom prostoru	[bar]
p_{stab}	minimalni tlak potreban za održavanje stabilnosti kanala bušotine	[bar]
ρ	gustoća isplake	[kg/m^3]

1. UVOD

Bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka jedan je od važnijih inovativnih postupaka izrade kanala bušotine za budućnost naftne industrije jer omogućava izradu bušotina koje nije bilo moguće izraditi konvencionalnom metodom bušenja. Najveća ograničenja konvencionalnog postupka izrade kanala bušotine odnose se na bušenje kroz slojeve visokog tlaka i temperature te raspucane slojeve koji uzrokuju velike gubitke isplake što u oba slučaja dovodi do smanjenja sigurnosti procesa bušenja i, naravno, povećanja neproduktivnog vremena.

Iako je do značajnijeg razvoja i porasta popularnosti došlo tek početkom 21. stoljeća, ideja i prva oprema za bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka javile su se još 30-tih godina prošlog stoljeća. Spomenuta oprema, opisana u katalozima kompanije Schaffer, vrlo je slična modernim rotirajućim bušaćim glavama koje danas predstavljaju osnovni dio sustava za bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka. Prve primjene ovog principa na kopnu, ali i u odobalnom bušenju, zabilježene su još 70-tih godina 20. stoljeća, a radilo se upravo o „Mud Cap“ metodi. U današnje je vrijeme teoretski princip isti kao i pred 40 godina, no razvoj softverske tehnologije uvelike olakšava primjenu i razvoj bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka te se smatra kako je upravo on doveo do ekspanzije bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka. Zahvaljujući tome postaje moguće bušenje kroz zone totalnih gubitaka isplake, iscrpljene zone, ležišta metanskih hidrata, zone visokog tlaka i temperature i bušenje u vrlo velikim dubinama mora.

Često se kao glavna ekonomska prednost bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka ističe smanjenje neproduktivnog vremena, jer su cijene najma bušaćih postrojenja vrlo visoke te kompanijama nikako nije u interesu trošiti i nekoliko mjeseci na pokušaje bušenja konvencionalnom metodom koji dovode do začaranog kruga gubitaka isplake i postupaka kontrole tlaka uslijed dotoka uzrokovanih gubicima isplake. To nerijetko znači da je ekonomičnije koristiti princip bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka čak i kad nije nemoguće izraditi bušotinu konvencionalnom metodom.

U ovom diplomskom radu bit će detaljno obrađene dvije varijante bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka – bušenje uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine i „Mud Cap“ bušenje, teorijske osnove na kojima se zasnivaju, te primjeri iz prakse.

2. BUŠENJE U UVJETIMA KONTROLIRANOG TLAKA

Međunarodno udruženje izvođača radova bušenja (IADC) bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka (engl. *MPD – Managed Pressure Drilling*) definira kao: „Prilagodljivi proces bušenja koji se koristi za preciznu kontrolu tlaka u prstenastom prostoru bušotine. Cilj je održavanje tlaka na dnu bušotine unutar određenih granica te kontroliranje raspodjele hidrauličkog tlaka u prstenastom prostoru. To se može odnositi na primjenu protutlaka korištenjem zatvorenog cirkulacijskog sustava, „Mud Cap“ metode bušenja uz primjenu tlaka, podzemne sisaljke u prstenastom prostoru ili sličnih mehaničkih naprava. Generalno gledano, bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka sprječava utok fluida u kanal bušotine.“

Hannegan i suradnici (2006.) opisuju MPD kao napredan oblik klasičnih postupaka kontrole tlaka u bušotini koji obično koristi zatvoreni sustav cirkulacije i stlačivi fluid čime se omogućuje preciznija kontrola tlaka u bušotini u odnosu na kontrolu tlaka promjenom gustoće isplake i parametara rada isplačne sisaljke. Glavna je posebnost ove metode u tome što isplaku koristi kao instrument za prijenos tlaka, a njezin primarni cilj smanjivanje neproduktivnog vremena (engl. *NPT – non-productive time*) i umanjivanje rizika tijekom operacija bušenja.

Strogo teoretski gledano, MPD predstavlja samo jednu od tri metode koje se smatraju bušenjem u uvjetima kontroliranog tlaka. Uz MPD, tu su i (Hannegan, 2006):

- Bušenje u uvjetima podtlaka (engl. *UBO – underbalanced operations*) koje je usmjereno na dizajn isplake s ciljem izazivanja dotoka kako bi se izbjeglo oštećenje ležišne stijene filtratom isplake i razrušenim česticama stijene; te
- Bušenje uz korištenje zraka ili plina za ispiranje kanala bušotine koje se koristi za ubrzavanje procesa bušenja u tvrdim stijenama s dodatnim ciljem smanjenja troškova u odnosu na korištenje konvencionalne isplake.

No, u ovom će se radu pojam bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka primjenjivati kao sinonim za MPD.

MPD je generalni pojam koji obuhvaća metode bušenja s preciznijom kontrolom tlaka u bušotini, a pojam objedinjuje ideje, tehnologiju i opremu s namjenom umanjivanja problema s kontrolom bušotine, gubicima isplake, diferencijalnim prihvatom alatki i potrebe za ugradnjom dodatnih kolona zaštitnih cijevi. Smatra se da MPD daje rješenja za različite

probleme koji se javljaju pri izradi kanala bušotine, a najznačajnija su sljedeća (Rehm et al., 2008):

- produljenje duljina pojedinih sekcija zaštitnih cijevi i time izbjegavanje prekomjernog suženja kanala bušotine;
- smanjeno neproduktivno vrijeme zbog manje učestalosti pojave diferencijalnog prihvata alatki;
- izbjegavanje izmjene scenarija gubitka isplake i nekontroliranog dotoka fluida zbog problema kontrole tlaka u bušotini;
- ograničavanje gubitaka isplake;
- omogućavanje bušenja uz totalne gubitke isplake;
- povećanje mehaničke brzine bušenja;
- omogućavanje bušenja u dubokom moru s gubicima isplake i dotocima vode.

2.1.Varijante bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka

Bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka dijeli se u dvije kategorije, proaktivnu i reaktivnu. Pojam reaktivnog MPD koristi se kada je planirano bušenje uz primjenu konvencionalnih postupaka i isplake, ali bušotina se oprema rotirajućom bušaćom glavom (engl. *RCD – rotating control device*), sapnicom i protupovratnim ventilima unutar bušaćih šipki kako bi se osiguralo kvalitetniju kontrolu tlaka u bušotini. Proaktivni MPD se, pak, od samog početka oslanja na prednosti koje u procesu bušenja donosi korištenje opreme za bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka. Smatra se da svojstvo stalnog balansiranja između bušenja u uvjetima ravnoteže i bušenja u uvjetima podtlaka pruža najbolje moguće preduvjete u odobalnom bušenju gdje se željene dubine mogu dosegnuti uz manji broj kolona zaštitnih cijevi, manje promjena svojstava isplake i manje neproduktivnog vremena, uz bolju kontrolu tlaka u bušotini, a time i sigurnost općenito.

Uz podjelu na spomenute dvije kategorije, u priči o MPD-u vrlo je važna podjela na četiri različite metode kontroliranja vrijednosti tlaka, odnosno kako ih se u literaturi naziva, varijante MPD-a (Rohani, 2011):

- Bušenje uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine (engl. *CBHP – Constant Bottomhole Pressure*)

CBHP metoda bušenja koristi se u bušotinama gdje tlak na dno bušotine treba precizno pratiti zbog male razlike između gradijenata slojnog tlaka i tlaka frakturiranja. Temelji se na nadomještanju komponente tlaka na dno uzrokovane trenjem isplake pri uzlaznom kretanju u prstenastom prostoru bušotine, koja nestaje za vrijeme prestanka cirkulacije isplake. Postoje dvije varijante za postizanje takvog efekta pri bušenju, a to su ostvarivanje protutlaka tijekom prestanka cirkulacije isplake i korištenje sustava za neprekidnu cirkulaciju isplake.

- Bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu dodatnog tlaka na statički fluid u prstenastom prostoru (engl. *PMCD - Pressurized Mud Cap Drilling*)

PMCD je metoda bušenja kojoj se pribjegava u trenutku pojave totalnih gubitaka isplake. Najčešće se to događa u frakturiranim i šupljikavim karbonatnim naslagama. Kako bi se mogla uspješno primjeniti, ova metoda bušenja zahtijeva takve gubitke da se može računati da će problematični sloj primiti sav utisnuti fluid i čestice razrušene stijene. Ukoliko taj uvjet nije zadovoljen, umjesto ove metode koristi se metoda bušenja uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine.

- Bušenje uz dvojni gradijent tlaka (engl. *DGD – Dual Gradient Drilling*)

Pojam bušenja uz dvojni gradijent tlaka najčešće se veže za bušenje u odobalju u uvjetima velikih dubina mora, gdje se rajzerski niz ispunjava morskom vodom kako bi se smanjio hidrostatski tlak stupca isplake na ležišnu stijenu. No, dvojni gradijent tlaka prisutan je kad god se u bušotini nalazi više od jedne vrste fluida, što uključuje i tzv. „*top kill*“ metodu kontrole tlaka u bušotini gdje se koristi isplaka nedovoljne gustoće za kontrolu tlaka u donjem dijelu bušotine, a isplaka veće gustoće utiskuje u gornjem dijelu kanala bušotine.

- Bušenje uz kontrolu povratnog toka isplake ili HSE metoda (engl. *HSE – Health, Safety, Environment*)

HSE metoda ne bazira se na praćenju tlaka u prstenastom prostoru, već se može koristiti kao sigurnosna mjera. Naime, u slučaju nekontroliranog dotoka u bušotinu, korištenje RCD-a omogućava preusmjeravanje toka isplake na razdjelnik podesive sapnice u kratkom roku, bez potrebe za zatvaranjem preventerskog sklopa. Time se smanjuje mogućnost istjecanja ugljikovodika na podište tornja i dozvoljava kretanje cjevnih alatki za vrijeme iscirkuliravanja dotoka ili tretiranja zaplinjene isplake (Nas et al., 2009).

Metoda bušenja uz održavanje stalnog tlaka na dno i „Mud Cap“ bušenje tema su ovog diplomskog rada te će stoga biti detaljno opisane u naknadnim poglavljima.

2.2. Potrebna oprema za bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka

Iako se oprema u određenoj mjeri razlikuje od metode do metode, tri su osnovne komponente, prema Hanneganu (2007.), neizostavne u svim metodama bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka te će biti ukratko opisane u ovom poglavlju.

2.2.1. Rotirajuća bušaća glava (RCD)

Rotirajuća bušaća glava koristi se za brtvljenje prstenastog prostora kanala bušotine i usmjeravanje toka isplake na MPD razdjelnik pomoću protočne prirubnice ugrađene ispod RCD-a. Ovaj brtveni element omogućuje rotaciju, te spuštanje i podizanje cjevnog alata uz kontrolu tlaka u prstenastom prostoru kanala bušotine. Klasični RCD predstavlja pasivni sustav gdje se njegovom aktivacijom aktivira guma kao brtveni element, a porastom tlaka u prstenastom prostoru jača njeno brtveno djelovanje. Ovaj se tip RCD-a najčešće koristi, iako je zadnjih godina razvijen i aktivni sustav – rotirajući prstenasti preventer koji se aktivira hidraulički.

API specifikacija 16RCD određuje standarde za proizvodnju i ispitivanje rotirajućih bušaćih glava, te predstavlja ključnu vodilju pri odabiru pravog tipa rotirajuće bušaće glave za specifične uvjete u pojedinoj bušotini. Postoje različite izvedbe RCD-a, ovisno o tome primjenjuju li se pri bušenju na kopnu ili u odobalju te za primjenu u odgovarajućim uvjetima u bušotini. Na slikama 2-1 i 2-2 nalaze se najmoderniji Weatherfordovi RCD sustavi – SafeShield i SeaShield, a njihovom usporedbom može se spoznati koliko je složeniji sustav za odobalno bušenje.



Slika 2-1. Weatherford Safeshield rotirajuća bušaća glava za bušaće radove na kopnu (*https://www.weatherford.com/en/products-and-services*)

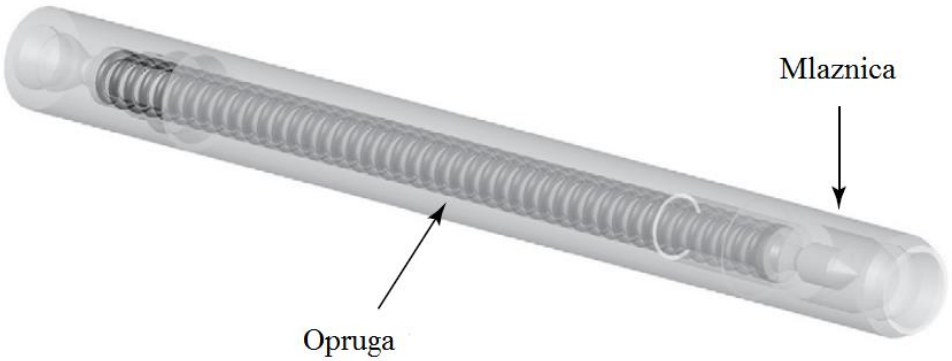


Slika 2-2. Weatherford SeaShield rotirajuća bušaća glava za bušaće radove u odobalju *(https://www.weatherford.com/en/products-and-services)*

2.2.2. Protupovratni ventili

Protupovratni ventili (engl. *NRV – non-return valve*) unutar bušaćih šipki neizostavan su dio opreme za svaku varijantu bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka zbog mogućnosti primjene protutlaka u prstenastom prostoru bušotine. Kad ne bi postojali protupovratni ventili, primjena tlaka u prstenastom prostoru potiskivala bi isplaku uzlazno kroz niz bušaćih alatki što može prouzrokovati brojne poteškoće, ali i kvarove opreme zbog suspendiranih čestica u isplaci. Kao i kod rotirajućih glava, postoje različite izvedbe protupovratnih ventila, od kojih Rehm et al. (2008) navode:

- klipni protupovratni ventil,
- hidrostatski aktivirani protupovratni ventil (Slika 2-3),
- unutarnji preventer (engl. *BOP – blowout preventer*),
- povrativi protupovratni ventil (engl. *Check Valve*).



Slika 2-3. Hidrostatski aktiviran protupovratni ventil (Rehm et al., 2008)

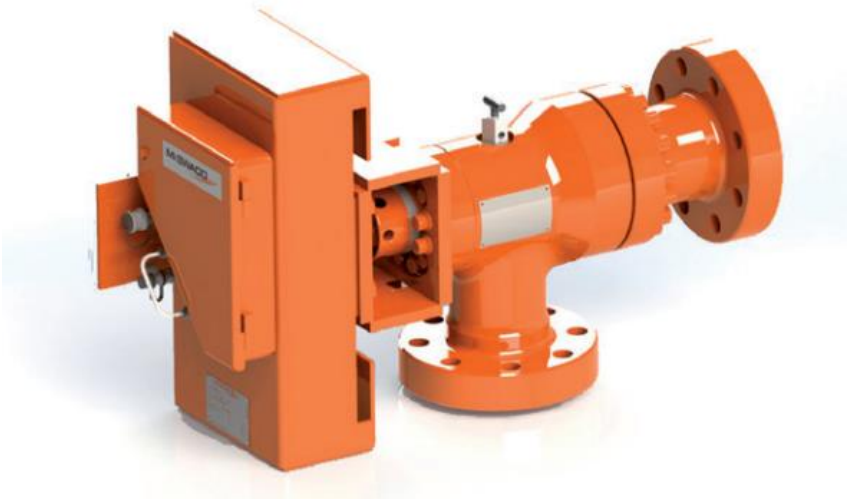
2.2.3. Sapnica

Sapnice koje se koriste za bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka instaliraju se neovisno o onima sadržanima u konvencionalnom sustavu za kontrolu tlaka u bušotini. U pravilu su to dva odvojena sustava zbog toga što je karakteristika MPD-a stalno korištenje sapnice, te se zbog povećane sigurnosti na postrojenju nalazi odvojeni sustav sapnica samo za postupke kontrole tlaka u bušotini, iako je oprema vrlo slična.

Zaporni elementi sapnice za MPD dijele se u tri kategorije: zaporni element koji prigušenje ostvaruje prekrivanjem otvora pomičnom pločom (engl. *choke gates*), zaporni element u obliku ploče na koju su unaprijed urezani otvori čijom rotacijom se obavlja

prigušenje (engl. *sliding plates*) i konusni zaporni element (engl. *shuttles*). Svi sustavi sapnica imaju upravljačke ploče s pokazivačima tlaka u bušaćim šipkama i u prstenastom prostoru, kontrole za zatvaranje sapnica i izvor energije za upravljanje sapnicama.

U današnje vrijeme postoje i sapnice s mogućnošću daljinske kontrole, a u literaturi se ističu dva proizvođača takvih sustava: Power Choke i M-I Swaco čija je „Super Choke“ sapnica prikazana slikama 2-4 i 2-5.



Slika 2-4. Daljinski upravljana sapnica SuperChoke kompanije MI Swaco (*https://www.slb.com/-/media/files/mi/product-heet/superchoke*)



Slika 2-5. M-I Swaco SuperChoke tri položaja zapornog elementa tipa ploče s unaprijed urezanim otvorima (*https://www.slb.com/-/media/files/mi/product-sheet/superchoke*)

3. MPD METODA BUŠENJA UZ ODRŽAVANJE STALNOG TLAKA NA DNO BUŠOTINE

Bušenje uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine najčešće je korištena varijanta bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka. Podrazumijeva proces u kojem se tlak održava ujednačenim ili približno jednakim na određenoj dubini u bušotini, tijekom i u prekidima cirkulacije isplake. Može se zaključiti kako pojam „stalnog tlaka“ u ovom kontekstu zapravo znači održavanje tlaka unutar određenih vrijednosti, određenih gornjom i donjom granicom koje, kao i u konvencionalnom bušenju, proizlaze iz pornog tlaka i traka frakturiranja naslaga (Rehm et al., 2008). Varijanta bušenja uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine jedinstvena je po tome što je namijenjena upravo za korištenje u okolnostima gdje je taj raspon dozvoljenog tlaka premalen da bi konvencionalno bušenje bilo uspješno (Hannegan et al., 2006).

Ovaj se raspon tlakova može matematički prikazati kako je prikazano jednadžbom 3-1:

$$p_p < p_{stab} < p_b < p_{dp} < p_{gub} < p_f \tag{3-1}$$

Pri čemu vrijedi:

p_p = slojni tlak

p_b= tlak na dnu bušotine (engl. *BHP – bottomhole pressure*)

p_{stab} = minimalni tlak potreban za održavanje stabilnosti kanala bušotine

p_{dp} = tlak diferencijalnog prihvata – razlika cirkulacijskog tlaka isplake i slojnog tlaka formacije na istoj dubini, zbog kojega dolazi do prianjanja bušaće kolone uz stijenku kanala bušotine odnosno do pojave diferencijalnog prihvata

p_{gub} = tlak gubitka cirkulacije – razlika cirkulacijskog tlaka isplake i slojnog tlaka na određenoj dubini, pri čemu je tlak u kanalu bušotine veći od slojnog tlaka što za posljedicu ima gubitak bušotinskog fluida

p_f = tlak frakturiranja naslaga

Kako u konvencionalnim operacijama, tako i pri bušenju u kontroliranim uvjetima tlaka, vrijedi temeljna jednadžba 3-2:

$$p_b = p_h + \Delta p_{pp} \tag{3-2}$$

Gdje je:

p_h = hidrostatski tlak stupca isplake (bar)

Δp_{pp} = smanjenje tlaka nastalo kao posljedica trenja tijekom protjecanja isplake prstenastim prostorom kanala bušotine (bar)

Smanjenje tlaka u prstenastom prostoru javlja se uslijed trenja pri cirkulaciji fluida te jednadžba 3-2 predstavlja dinamičku vrijednost tlaka u bušotini koju je moguće izraziti i kroz ekvivalentnu cirkulacijsku gustoću (engl. *ECD – equivalent circulating density*). Kad se pumpe zaustave, gubi se komponenta tlaka koja se javlja kao posljedica smanjenja tlaka u prstenastom prostoru uslijed trenja te u statičkim uvjetima vrijedi jednadžba 3-3:

$$p_b = p_h \tag{3-3}$$

Kad se buši u zonama gdje je razlika između gradijenata slojnog tlaka i tlaka frakturiranja naslaga mala, dodatni tlak na dno ostvaren zbog smanjenja tlaka uslijed trenja u prstenastom prostoru može značiti razliku između bušotine pod kontrolom i pojave dotoka. Zbog toga se u ovakvim uvjetima primjenjuje zatvoreni sustav optoka isplake u kojem se zatvara ušće bušotine i time dobiva mogućnost kontroliranja tlaka u prstenastom prostoru ostvarivanjem protutlaka na ušću (Ali et al., 2014). Uvođenjem dodatnog faktora kontrole tlaka u bušotini, jednadžba 3-2 se mijenja i glasi:

$$p_b = p_h + \Delta p_{pp} + p_{pt} \tag{3-4}$$

Gdje je:

p_{pt} = protutlak ostvaren djelovanjem na površini (bar)

Primjenom varijante bušenja uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine, pri izvođenju bilo koje operacije, u statičkim ili dinamičkim uvjetima, moguće je održati potrebnu vrijednost tlaka u bušotini da ne dođe do dotoka ni gubitaka. U idealnim okolnostima, p_{pt} je maksimalan u statičkim uvjetima i jednak je dinamičkoj vrijednosti Δp_{pp} (Guo et al., 2011).

3.1.Postupak proračuna potrebne gustoće isplake i vrijednosti protutlaka

Proračuni vezani uz ovu metodu sastoje se od dva dijela, odnosno proračune koji se izvode tijekom pripreme same operacije te praćenja i proračuna u stvarnom vremenu tijekom provođenja operacija bušenja uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine. Tijekom pripreme operacije proračun potrebnih tlakova i gustoće isplake odvija se na sljedeći način (Guo et al., 2011):

(1) određuje se maksimalni gradijent slojnog tlaka u problematičnim intervalima i proračunava ECD;
(2) pretpostavlja se gustoća isplake ρ_1 u vrijednosti ECD i proračunava se dodatni tlak na dno uslijed trenja pri uzlaznom protoku isplake u prstenastom prostoru (Δp_{pp});
(3) Vrijednost Δp_{pp} uzima se kao vrijednost p_{pt} iz čega se proračunava gustoća isplake ρ_2 u statičnim uvjetima;
(4) Uspoređuju se vrijednosti ρ_1 i ρ_2 i kada je njihova razlika manja od unaprijed određenog faktora *e*, ide se na korak (6), a ako nije na (5);
(5) $\rho_1 = \rho_2$, ponoviti korake od (2) do (4);
(6) ρ_1 i p_{bp} su željene vrijednosti proračuna.

Iako se konvencionalni dizajn isplake temelji na njenoj zadaći da hidrostatski tlak u bušotini bude dostatan za ostvarivanje nadtlaka na određeni sloj, u slučaju bušenja uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine ta se zadaća isplake zanemaruje. Preciznije rečeno, isplaka se dimenzionira s puno manjom sigurnosnom marginom nego što je u konvencionalnom bušenju preporučljivo, a u nekim slučajevima projektira se tako da dođe do malog podtlaka u statičkim uvjetima, kako ne bi došlo do frakturiranja naslaga u nastavku bušenja. Manji podtlak do kojeg u nekim slučajevima dolazi prestankom cirkulacije isplake, automatski se anulira ostvarivanjem tlaka na prstenasti prostor s površine (Hannegan et al., 2006).

Tijekom bušenja, mnogi faktori utječu na promjenu tlaka u prstenastom prostoru (npr. rad pumpi, krhotine u isplaci, klipovanje, brzina bušenja) te su zato potrebni proračuni tlaka na dno bušotine u stvarnom vremenu. Postupak operacijskog proračuna je sljedeći (Guo et al., 2011):

(1) izračunava se tlak na dno bušotine iz hidrauličkih parametara, odnosno hidrostatskog tlaka, smanjenja tlaka u prstenastom prostoru te dobave pumpe;

(2) ta se vrijednost oduzima od željenog tlaka na dno i razlika te dvije vrijednosti predstavlja potrebnu vrijednost protutlaka;
(3) vrijednost iz koraka (2) prenosi se do sustava za kontrolu tlaka na ušću bušotine;
(4) koraci (1), (2) i (3) ponavljaju se u određenom vremenskom intervalu, najčešće svakih 30 sekundi ili 1 minutu sve do kraja procesa bušenja.

3.2. Podjela metoda bušenja s održavanjem stalnog tlaka na dno

Postoji nekoliko podjela metode bušenja u uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine, no najsistematičniju je podjelu iznio Nauduri (2009.) te će ona biti korištena u ovom radu.

Temeljna podjela ove varijante MPD-a proizlazi iz načina kontrole tlaka u bušotini te postoje dvije različite metode – metoda neprekinute cirkulacije isplake (engl. *CCS – continuous circulation system*) i metoda ostvarivanja protutlaka na ušću bušotine (engl. *ABP – applied back pressure*).

4. METODA NEPREKINUTE CIRKULACIJE ISPLAKE

Veliki korak za napredak rotacijskog bušenja učinjen je 2003. godine kada je po prvi put bušotina izbušena bez prestanka cirkulacije pri dodavanju bušaćih šipki u niz. Iako je otada prošlo dosta vremena i sustavi su se donekle modernizirali, temeljna načela i prednosti metode bušenja uz neprekinutu cirkulaciju isplake (engl. *CCS – continuous circulation system*) ostale su iste. Glavnim prednostima ove metode smatra se sljedeće (Jenner et al., 2005):

- eliminacija varijacija tlaka u bušotini koje uzrokuje periodični prestanak i uspostavljanje cirkulacije tijekom dodavanja bušaćih šipki;
- ne gubi se vrijeme na iscirkuliravanje krhotina iz prstonastog prostora oko dubinskog bušaćeg sklopa prije dodavanja šipki;
- poboljšana kontrola svojstava isplake;
- ne dolazi do dotoka za vrijeme prestanka cirkulacije;
- poboljšana kontrola ECD-a;
- smanjeno vrijeme potrebno za dodavanje pojedine bušaće šipke (engl. *connection time*);
- smanjena vjerojatnost zaglave alata tijekom dodavanja bušaćih šipki;
- u bušotinama gdje prevladavaju uvjeti visokog tlaka i visoke temperature (engl. *HPHT – high pressure, high temperature*) ne gubi se vrijeme na iscirkuliravanje plina koji ulazi u kanal bušotine tijekom obustave rada sisaljki (engl. c*onnection gas*);
- umanjuje se efekt gubljenja male količine isplake u mikro frakture zbog ekvivalentne cirkulacijske gustoće koja premašuje tlak frakturiranja te povratak isplake iz mikro fraktura prestankom cirkulacije koji se ponekad može krivo protumačiti kao dotok u kanal bušotine (engl. *breathing* ili *ballooning*);
- općenito poboljšanje stabilnosti kanala bušotine;
- poboljšana sigurnost uvjeta rada na podištu tornja.

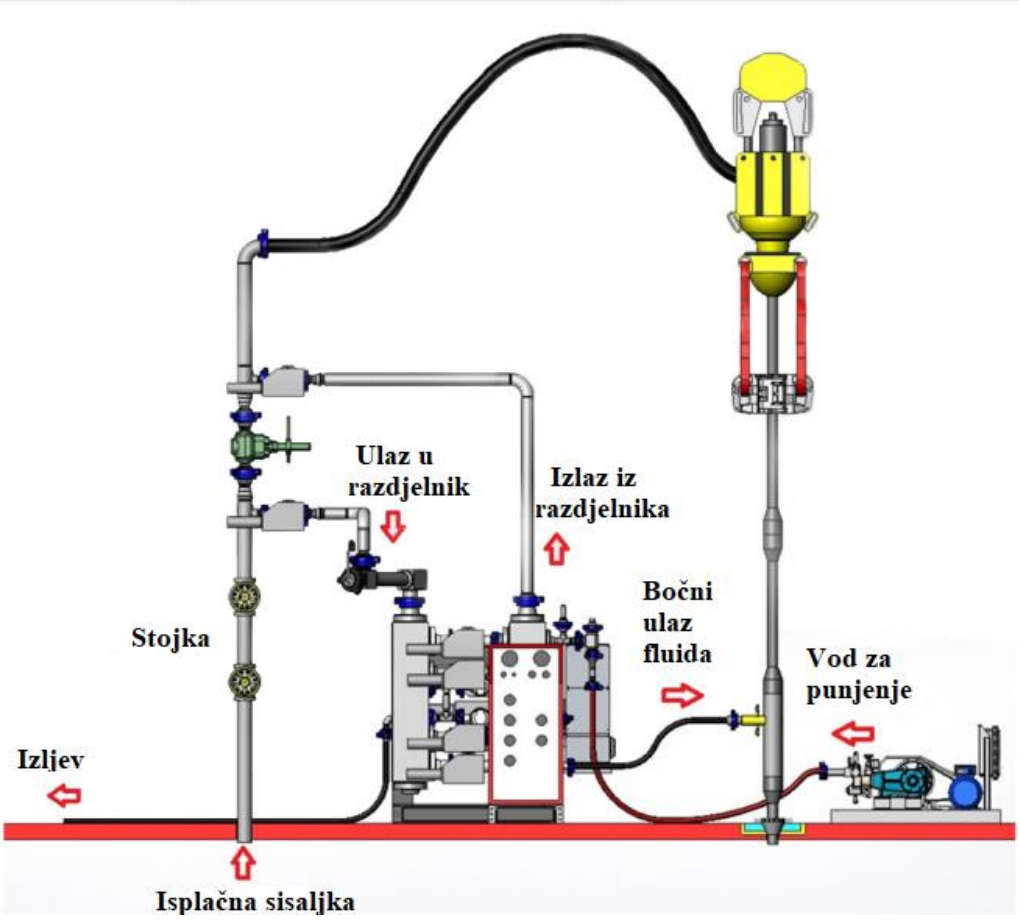
Sustav za neprekinutu cirkulaciju isplake sastoji se od tri glavna dijela (Nauduri, 2009):

- spojnice za neprekinutu cirkulaciju (engl. *CCC – continuous circulation coupler*);
- razdjelnika (usmjerivača) toka isplake (engl. *mud flow diverter manifold*) ;
- hidrauličkog pogonskog sustava (engl. *HPU - hydraulic power unit*).

Spojnica za neprekinutu cirkulaciju bit će naknadno detaljnije opisana kao ključni element sustava.

Razdjelnik (usmjerivač) toka isplake je sustav zasuna između isplačnih sisaljki i stojke. Glavna karakteristika ovog razdjelnika jest visokotlačno crijevo koje ga spaja s bočnim otvorom na CCC spojnici, a služi za kontrolu toka isplake između vršnog pogona i CCC spojnice prilikom dodavanja ili izbacivanja bušaćih šipki iz niza bušaćih alatki. Na slici 4-1. prikazan je sustav e-cd (engl. *ENI circulating device*) koji je patentirala tvrtka ENI, a ističe se kao jedan od najčešće korištenih sustava za neprekinutu cirkulaciju u naftnoj industriji (www.halliburton.com). Hidraulička pogonska jedinica (HPU) je standardnog Varco dizajna, kapaciteta od oko 12 m^3/h pri 207 bar (54 gpm na 3000 psi). HPU služi kao izvor tlaka za pokretanje hidrauličkih sustava, a osnovni dijelovi su motor, spremnik i sisaljka. Pokazatelji vezani uz protok i tlak hidrauličkog fluida zapravo su karakteristika snage sisaljke koja se bira upravo prema potrebnim vrijednostima tlaka i protoka tog fluida.

Cijeli je sustav automatski, ali pod kontrolom bušača koji na zaslonu osjetljivom na dodir nadgleda proces i ima mogućnost zaustavljanja procesa u bilo kojem trenutku (Jenner et al., 2005).



Slika 4-1. Razdjelnik (usmjerivač) toka isplake kao dio e-cd sustava kompanije ENI (https://www.halliburton.com)

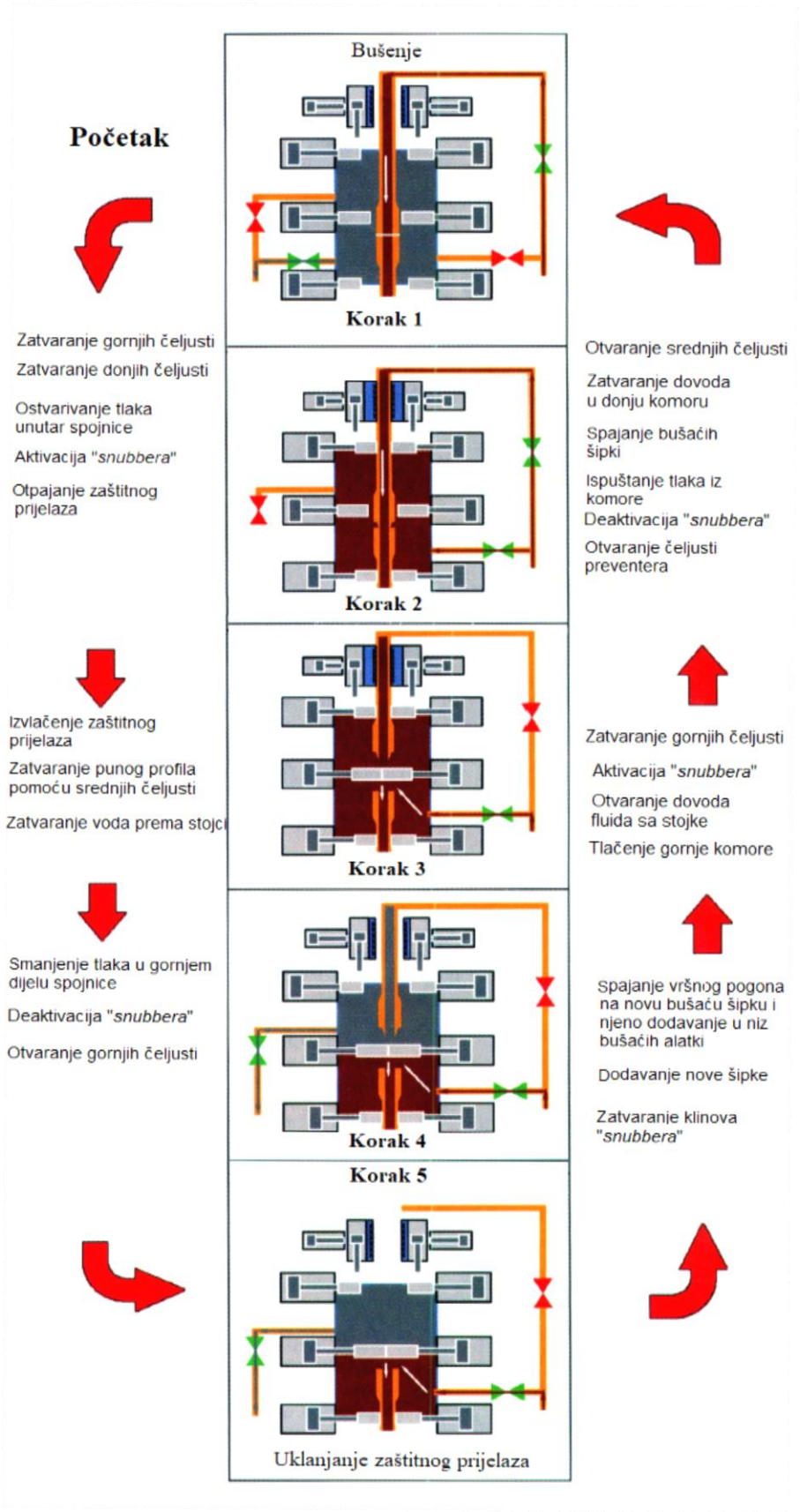
4.1.Spojnica za neprekinutu cirkulaciju isplake

Ključni element, popularno nazvan srcem ovog sustava, predstavlja spojnica za neprekinutu cirkulaciju (CCC spojnica). Ta je spojnica zapravo komora s kontroliranim tlakom i nalazi se na podištu tornja.

CCC spojnica sastoji se od tri spojena čeljusna preventera otvora 0,2286 m (9") i maksimalnog radnog tlaka 348 bar (5000 psi). Donji i gornji preventeri imaju čeljusti za brtvljenje oko šipki (engl. *pipe rams*), a srednji ima uloške za zatvaranje punog profila (engl. *blind rams*). Sklop za rukovanje bušaćim šipkama u uvjetima visokog tlaka, „snubber“, postavlja se iznad CCC spojnice, odnosno gornjeg preventera i s njim je spojen pomoću četiri hidrauličke čeljusti (engl. *hydraulic rams*), koje pomažu u kontroliranom podizanju i spuštanju šipke i spojnice kroz komoru pod tlakom. Unutar samog „snubbera“ nalaze se stezaljke, pomoću kojih se rotacija prenosi s četiri manja hidraulička motora i

zupčanika na tijelo bušaće šipke omogućujući na taj način njeno navrtanje i odvrtanje. Sama spojnica za neprekinutu cirkulaciju nalazi se u zaštitnom kavezu na posebnom postolju (engl. *skid*) te se pripadajućom dizalicom postavlja se na željenu visinu, ovisno o visini vrtaćeg stola.

Kako bi bilo moguće izvesti operaciju dodavanja nove bušaće šipke u niz bez zaustavljanja cirkulacije, uspostavlja se cirkulacija isplake kroz spojnicu (komoru) po dolasku spojnice bušaćih šipki. Tada u komori vlada isti tlak unutar i izvan šipki, one se odvajaju pomoću „snubbera“ i muška spojnica (gornja strana spoja) vadi se iz komore. CCC je podijeljen na dva dijela odvojena brtvenim elementom zbog čega je moguće u donjem dijelu zadržati postojeći tlak dok se gornji otvara kako bi se izvadila spojnica vršnog pogona kojom se isti spaja na niz bušaćih šipki. Nova bušaća šipka, spojena na vršni pogon pomoću spomenute posebne spojnice (engl. *top drive connection tool*), spušta se u gornji dio komore koji se potom zatvara i vraća na cirkulaciju kroz stojku, gibljivo crijevo i vršni pogon. Izjednačavanjem tlaka u dva dijela komore, brtveni element se otvara i šipke se spajaju. Nakon ostvarenog spoja, otvara se komora, ispušta se tlak i može se nastaviti s bušenjem. Cijeli je postupak prikazan na slici 4-2 (Jenner et al., 2005).



Slika 4-2. Prikaz procesa spajanja ili odpajanja bušaće šipke uz primjenu spojnice za neprekinutu cirkulaciju (Nauduri, 2009)

4.2. Prijelaz za neprekinuti protok isplake

Nešto jednostavnija varijanta za uspostavljanje neprekinute cirkulacije isplake je korištenje prijelaza za neprekinuti protok isplake (engl. *CCV – continuous circulation valve*). Prijelazni komad ugrađuje se na vrh svake bušaće šipke, i omogućuje normalnu cirkulaciju kroz šipku za vrijeme bušenja, ili kroz bočni otvor za vrijeme spajanja šipki. Na bočni otvor ventila spaja se visokotlačno crijevo s razdjelnika toka isplake čime se isplaka preusmjerava kroz ventil, umjesto kroz vršni pogon, te se on može odspojiti (Farahat et al., 2017).

Tvrtka ENI patentirala je ovakvu verziju alatke za prijelaz na CCS sustav kao dio svog e-cd sustava, a prikazan je na slici 4-3. Može se spomenuti i varijanta tvrtke Nabors – Non Stop Driller koja funkcionira na istom principu – a uz e-cd čini par najmodernijih CCS sustava današnjice.



Slika 4-3. Prijelaz za ostvarivanje neprekinute cirkulacije isplake tijekom dodavanja bušaćih šipki (https://www.halliburton.com)

5. METODA ODRŽAVANJA STALNOG TLAKA NA DNO OSTVARIVANJEM PROTUTLAKA NA UŠĆU BUŠOTINE

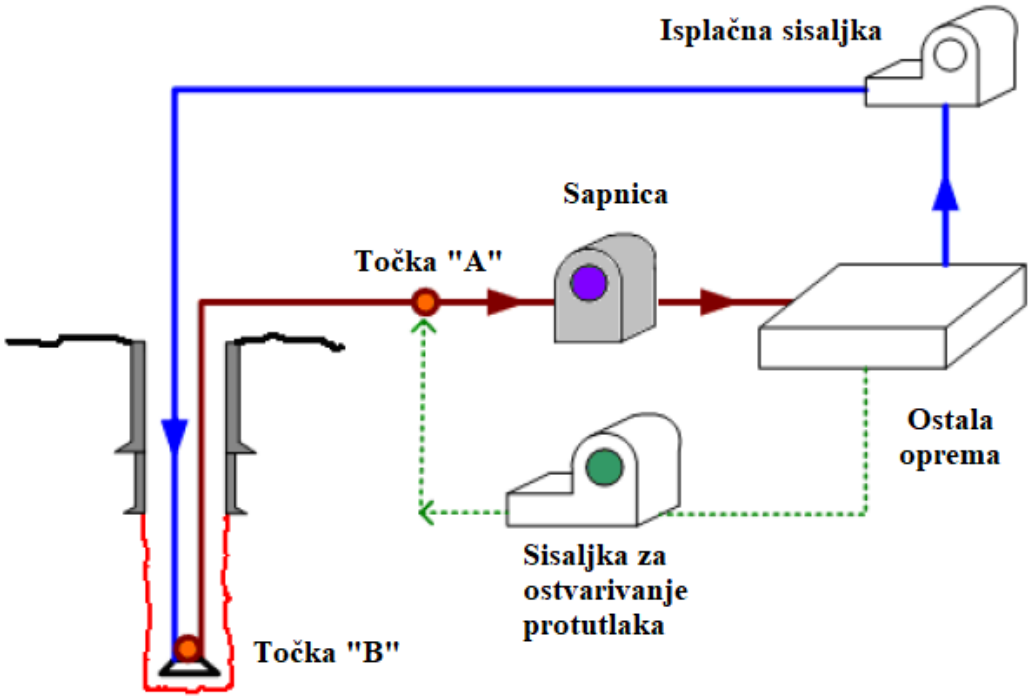
Druga od dviju metoda bušenja uz održavanje stalnog tlaka na dno oslanja se na ujednačavanje tlaka u bušotini ostvarivanjem protutlaka na ušću bušotine (engl. *ABP – applied back pressure*). Kad se spominje bušenje uz održavanje stalnog tlaka na dno kanala bušotine, uglavnom se podrazumijeva upotreba ove metode.

Protutlak se može ostvarivati na dva moguća načina, korištenjem podesive sapnice ili posebnih sisaljki za povećanje tlaka u prstenastom prostoru.

5.1. Ostvarivanje protutlaka upotrebom sisaljke

Pri ovakvom ostvarivanju protutlaka, sisaljka se spaja na izljevnu cijev isplačnog sustava (na shemi sustava prikazanoj na slici 5-1 spoj je označen kao točka „A“). Ukoliko nije dostupna sisaljka namijenjena ovom postupku, može se koristiti rezervna isplačna sisaljka ili agregat za cementaciju.

Ukoliko se pretpostavi vrijednost tlaka u točki „A“ (Slika 5-1) uz ugašenu sisaljku za protutlak kao vrijednost „X“, a dok je sisaljka upaljena kao vrijednost „Y“, može se pojasniti koncept funkcioniranja ove metode. Naime, ukoliko je vrijednost „Y“ manja od vrijednosti „X“, jasno je kako sisaljka za protutlak ne može potisnuti isplaku prema kanalu bušotine i na taj način ostvariti dodatan tlak na dno kanala bušotine. Dalje se pretpostavlja točka „B“ na mjestu dlijeta te vrijednosti tlaka na dnu bušotine BHP-1 (engl. *BHP – bottomhole pressure*) kad je sisaljka ugašena i BHP-2 tijekom njena rada. Bez obzira na to radi li sisaljka za ostvarivanje protutlaka ili ne, tlak se u sustavu uvijek povećava od točke „A“ prema točki „B“. Sukladno tome, BHP-2 uvijek je veći od BHP-1 sve dok vrijedi relacija „Y“ > “X“. Tlak u točki „A“ povećat će se u trenutku pokretanja sisaljke za vrijednost „Y – X bar“ što se naziva protutlakom (engl. *Backpressure*). Jednoliko povećanje tlaka proteže se kroz cijeli kanal bušotine do točke „B“ ukoliko se drugi parametri u sustavu ne mijenjaju.



Slika 5-1. Shema sustava za bušenje uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine uz primjenu sisaljki za protutlak (Nauduri, 2009)

Temeljem objašnjene logike, protutlak ostvaren u prstenastom prostoru kanala bušotine jednak je razlici tlaka u prstenastom prostoru kanala bušotine na razini ušća za vrijeme prestanka cirkulacije isplake i tlaka koji ostvaruje sisaljka za protutlak na isplaku u suprotnom smjeru. S obzirom da se tlak sisaljke jednostavno regulira promjenom dobave sisaljke, moguća je precizna kontrola primijenjenog protutlaka i sukladno tome održavanje stalnog tlaka na dno bušotine. Iz ovog se razloga ova metoda primjenjuje kad je razlika pornog tlaka i tlaka frakturiranja naslaga ekstremno mala (Nauduri, 2009).

5.2. Ostvarivanje protutlaka pomoću podesive sapnice

Pri ovakvom načinu ostvarivanja protutlaka, ključni element sustava je razdjelnik podesive sapnice spojen na rotirajuću bušaću glavu. Sustavi razdjelnika podesive sapnice za održavanje stalnog tlaka na dno bušotine razlikuju se na osnovu (Rehm et al., 2008):

- načina kontrole sapnice;
- integracije kontrole sapnice i hidrauličkog modela;

- upotrebe podataka o tlakovima u kanalu bušotine tijekom bušenja (engl. *PWD – pressure while drilling*) za kalibriranje hidrauličkog modela;
- mogućnosti i brzine prilagodbe hidrauličkog modela u stvarnom vremenu;
- mogućnosti neovisnog ostvarivanja tlaka na ušće pomoću posebne sisaljke;

Važno je napomenuti da sustavi podesive sapnice mogu biti ručno upravljani, polu-automatski ili u potpunosti automatizirani (Rehm et al., 2008). Princip je isti kao pri korištenju sisaljke za ostvarenje protutlaka, ali manualno i polu-automatski regulirana sapnica značajno je nepreciznija te se koristi pri bušenju kroz slojeve nešto veće razlike slojnog i tlaka frakturiranja. Primjerice, ukoliko je ta razlika manja od 1,4 bar (20 psi), potrebno je koristiti sisaljku za protutlak ili automatski kontroliranu podesivu sapnicu, ali ukoliko je razlika do 14 bar (200 psi) može se koristiti ručno regulirana sapnica (Nauduri, 2009).

5.3. Sustav za kontrolu dinamičkog tlaka u prstenastom prostoru (DAPC)

Automatizirani sustavi uvijek su značajno skuplji od ručno reguliranih te je za maksimalnu ekonomičnost projekta važan pravilan odabir opreme. Međutim, bušenje uz održavanje stalnog tlaka na dno jedna je od metoda bušenja koje se razmatraju onda kada konvencionalnim postupkom bušenja nije moguće izraditi projektiranu bušotinu, te kada druge alternativne metode izrade kanala bušotine nisu primjenjive. Zbog toga se vrlo često koriste upravo automatizirani sustavi te će takav sustav biti detaljnije opisan u ovom potpoglavlju.

Postoje različiti automatizirani sustavi za metodu bušenja uz održavanje stalnog tlaka na dno primjenom protutlaka na ušću bušotine, a navedeni su najpoznatiji (Farahat et al., 2016):

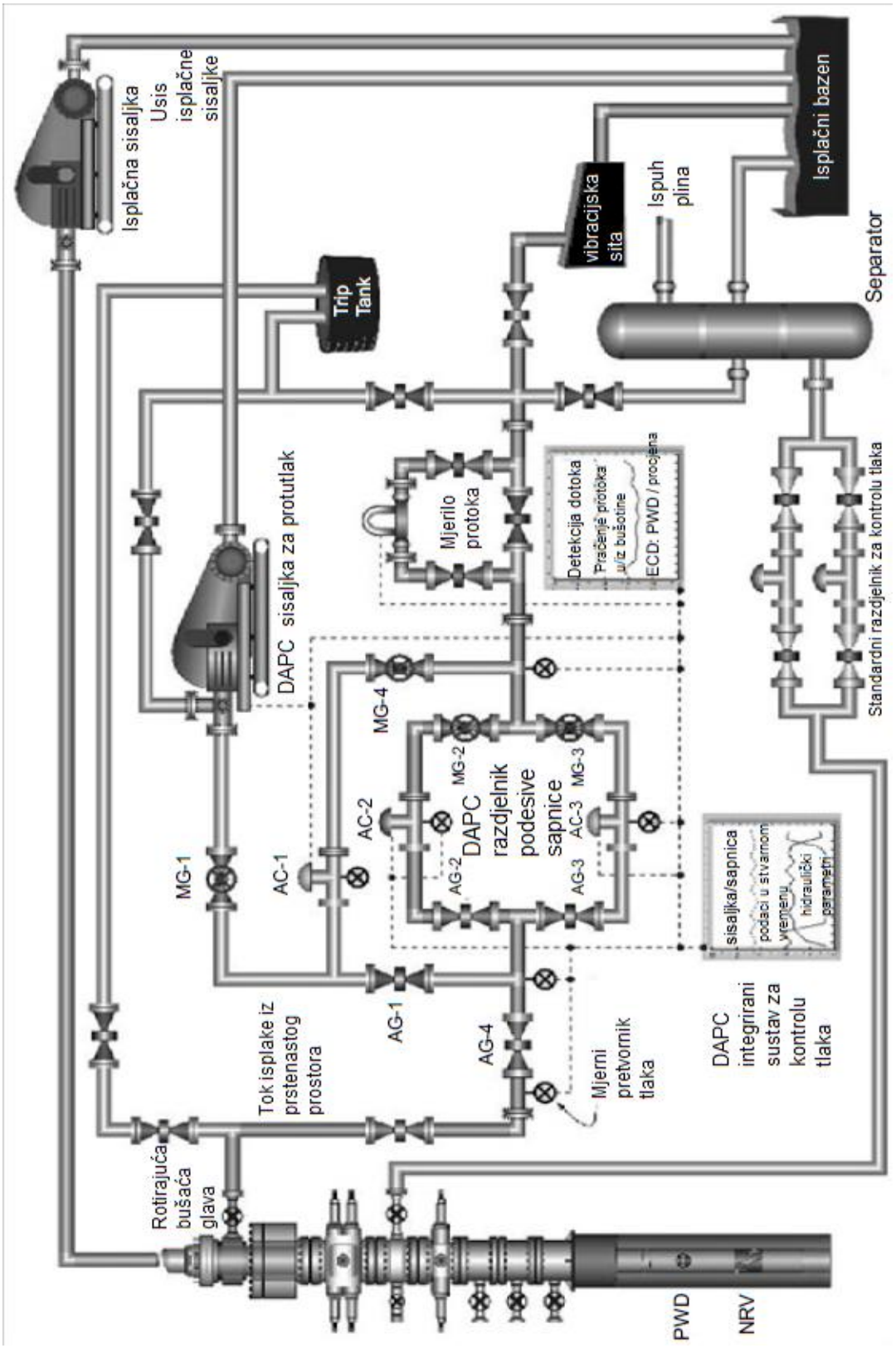
- sustav za kontrolu dinamičkog tlaka u prstenastom prostoru (engl. *DAPC - Dynamic Annular Pressure Control*);
- sustav za kontrolu dinamičkog tlaka u prstenastom prostoru s modificiranim razdjelnikom podesive sapnice (engl. *DAPC with modified choke manifold*) ;
- sustav za kontrolu dinamičkog tlaka u prstenastom prostoru bez sisaljke za ostvarivanje protutlaka;

- sustav za bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka bez Coriolisovog mjernog pretvornika protoka;
- sustav za bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka s preusmjerivačem protoka (engl. RPD - *rig pump diverter*) za usmjeravanje isplake sa stojke i isplačnih sisaljki na razdjelnik koji osigurava dodavanje bušaćih šipki bez prekida cirkulacije;
- Microflux^{TM} sustav (Weatherfordova inačica sustava za bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka)

Svi se sustavi temelje na osnovnom principu koji je predstavljen 2005. godine inovacijom sustava za kontrolu dinamičkog tlaka. To je sustav koji integrira primjenu podesive sapnice i sisaljke za protutlak za ostvarivanje najboljih rezultata.

Na slici 5-2 nalazi se shema DAPC sustava iz koje se može zaključiti kako isti čine četiri osnovna dijela (Rehm et al., 2008):

- razdjelnik podesive sapnice,
- sisaljka za protutlak,
- integrirani sustav za kontrolu tlaka (engl. *pressure manager*),
- hidraulički model.



Slika 5-2. Shema DAPC sustava (Rehm et al., 2008)

5.3.1. DAPC razdjelnik podesive sapnice

Postoje zamjetne razlike između razdjelnika za operacije na kopnu i na moru, gdje su razdjelnici za bušenje u odobalju robusniji zbog dodatnih pravila o sigurnosti, ali i logističkih razloga. Razdjelnik koji se koristi kod bušenja na moru (Slika 5-3) ima tri sapnice, dvije glavne (oznake AC-2 i AC-3 na slici 5-2) i jednu rezervnu (AC-1 na slici 5-2), dok je kopneni razdjelnik nešto jednostavniji sa samo dvije sapnice jer je praksa pokazala kako treća, rezervna, nije potrebna tijekom kopnenih MPD operacija. Tijekom izvođenja operacija, cirkulacija se vrši kroz jednu od (glavnih) sapnica, te samo u posebnim slučajevima velikih protoka kroz obje. Teoretski, kad su sapnice potpuno otvorene, ne ostvaruje se protutlak, a kad su potpuno zatvorene, nema cirkulacije. U normalnim okolnostima, sapnice se potpuno zatvaraju samo ako je cirkulacija već zaustavljena.

Ovakav automatizirani sustav konstantno preračunava potrebnu vrijednost protutlaka i regulira položaj sapnice, održavajući tlak na dno kanala bušotine unutar dozvoljenih granica. Dodatna je prednost automatizacije ta što u slučaju čepljenja sapnice sustav automatski preusmjerava protok kroz drugu sapnicu te nije potrebna ljudska intervencija i izbjegava se opasnost od frakturiranja naslaga uslijed naglog porasta tlaka u kanalu bušotine.

Svaki ovakav sustav mora imati sigurnosni ventil za smanjenje tlaka, u slučaju kvara. Obično se ventil s tom namjenom nalazi između rotirajuće bušaće glave i razdjelnika, a dodatna prednost automatskog razdjelnika jest ta što se rezervna sapnica može koristiti kao rezervni (ili čak primarni) ventil za smanjenje tlaka (engl. *PRV – pressure relief valve*).

Postoji posebna procedura za održavanje vrijednosti tlaka u sustavu tijekom dodavanja bušaće šipke. Bušač mora zadignuti dlijeto s dna bušotine i smanjiti protok. Kontroler sustava DAPC tada pali sisaljku za ostvarivanje protutlaka i korigira otvor na sapnici, kao odgovor na smanjeni tlak cirkulacije. Senzori tlaka u razdjelniku šalju u sustav podatke u realnom vremenu i u skladu s njima kontroler stalno korigira rad sapnice. U manualnom ili polu-automatskom sustavu ove korekcije sapnice mora obavljati čovjek te je stoga sustav podložan većim varijacijama tlaka nego što je slučaj uz primjenu sustava DAPC (Rehm et al., 2008).

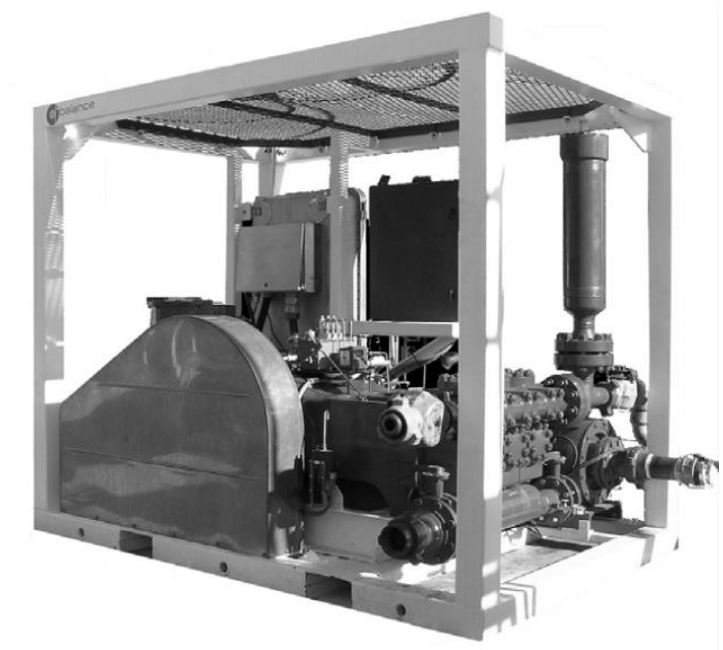


Slika 5-3. Automatizirani razdjelnik podesive sapnice (Reynolds, 2014)

5.3.2. Sisaljka za ostvarivanje protutlaka u DAPC sustavu

Za vrijeme cirkulacije isplake, najčešće je dovoljna regulacija tlaka sapnicom. No, kako se smanjuje tlak na dno kanala bušotine koji nastaje kao posljedica cirkulacije isplake, sapnica se mora sve više zatvarati te se potpuno zatvara s prestankom cirkulacije kako bi očuvala čim veći tlak u kanalu bušotine. Tada se javlja potreba za sisaljkom za ostvarivanje protutlaka kao dodatnim izvorom tlaka, kako ne bi došlo do varijacije tlaka u bušotini, ili čak mogućeg gubitka kontrole nad bušotinom u slučaju vrlo male razlike između slojnog i tlaka frakturiranja.

Sustav DAPC opremljen je trocilindričnom sisaljkom za ostvarivanje protutlaka malog kapaciteta (Slika 5-4) spojenom na razdjelnik podesive sapnice koju sustav kontrolira automatski. Kad god integrirani sustav za kontrolu tlaka detektira da je cirkulacija iz bušotine nedostatna za održavanje potrebnog protutlaka, automatski se pušta u rad sisaljka za protutlak (Rehm et al., 2008).



Slika 5-4. Sisaljka za protutlak (Rehm et al., 2008)

5.3.3. Integrirani sustav za kontrolu tlaka

Automatizirani sustav za kontrolu tlaka mora moći odgovoriti na promjene u sustavu u najkraćem mogućem roku. Zbog toga su sve komponente sustava DAPC, uključujući i hidraulički model koji se mijenja u realnom vremenu i kontroler sustava, međusobno povezani u mrežu s visokom brzinom prijenosa informacija. Računalni program za kontrolu tlaka oslanja se na podatke koje dobiva od programabilnog logičkog kontrolera (PLC) dizajniranog za prikupljanje podataka sa senzora tlaka, kontrolu i prilagođavanje položaja sapnice te nadgledanje i upravljanje sisaljkom za protutlak. PLC kontroler i računalni program zajedno čine integrirani sustav za kontrolu tlaka i povezani su mrežom sa sisaljkom za protutlak, razdjelnikom podesive sapnice, mrežom za prikupljanje podataka i korisničkim sučeljem. Također, istom je mrežom integrirani sustav za kontrolu tlaka povezan s trenutnim hidrauličkim modelom koji proračunava tlak na dnu kanala bušotine te na temelju rezultata proračuna automatski poduzima radnje koje imaju za cilj održavanje tlaka na dno kanala bušotine na određenoj razini. Sustav na temelju hidrauličkog modela računa svake sekunde tlak na dno kanala bušotine, i rekalibrira se svaki put kad primi nove podatke o tlaku iz mjernog pretvornika tlaka koji se nalazi u bušotini. Što češće se proračunava tlak na dnu bušotine, to je model precizniji i tlak u bušotini ujednačeniji. Većina modela koji se koriste za proračun su jednofazni modeli, što znači da je njihova primjena ograničena na jednofazne isplake (Rehm et al., 2008).

6. PRIMJENA MPD METODE ODRŽAVANJA STALNOG TLAKA NA DNO BUŠOTINE U PRAKSI

Kako nije bilo moguće pronaći primjer polja na kojem se koristilo više različitih metoda bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka, u ovom će poglavlju biti navedena zapažanja nastala tijekom tri različite primjene varijanti bušenja uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine. Uzeti su slučajevi koji se značajno razlikuju u smislu okolnosti primjene MPD-a. Jedan je slučaj primjene ove metode za bušenje istražne bušotine, u drugom slučaju radi se o svladavanju izazova na koje se nailazi tijekom izrade bušotine u uvjetima visokog tlaka i visoke temperature, dok je treća primjena nešto različita i teoretski, budući da se radi o primjeni dvofazne, isplake plinificirane dušikom.

6.1. Izrada istražne bušotine BTE-2 u Egiptu

Izrada bušotina BTE-2 planirana je zbog potrebe za istraživanjem Zapadne pustinje u Egiptu, područja poznatog po rezervama prirodnog plina. Litološki stupac razmatranog područja je poznat, te je za dosezanje formacije „Kharita“ bilo potrebno probušiti formaciju „Abu Roash – F“ (AR-F). Taj je sloj, prema tada dostupnim podacima bio ocijenjen kao područje značajno povišenog tlaka, zbog čega je prethodna bušotina BTE-1 projektirana tako da ne prolazi kroz sloj AR-F. Osnovni cilj bušotine BTE-2 bilo je istraživanje te problematične formacije kako bi u budućnosti bili poznati parametri za projektiranje sljedećih bušotina u tom području kojima je zajednički cilj dosezanje plinonosne formacije „Kharita“.

Glavni tehnički izazovi koji su rezultirali odabirom MPD bušenja su (Emam et al., 2018):

- nedostatak podataka;
- očekivane visoke vrijednosti temperature;
- nesigurnost u procjeni tlakova pojedinih formacija;
- velika dubine bušotine.

Odlučeno je kako će se MPD primijeniti u fazi bušenja dijela kanala promjera 0,2159 m (8 ½"), u kojem se nalaze čak dva proslojka s velikom nesigurnošću procjene slojnog

tlaka. To su „C“ i „F“ zona spomenute formacije Abu-Roash (AR-C i AR-F), a za svaki proslojak procijenjene su tri vrijednosti tlaka – donja, srednja i gornja.

Uz gustoću isplake od približno 1440 kg/m^3 (12 ppg) i dobavu isplake od približno 0,0222 m^3/s (350 gpm), primijenjeni protutlak povećan je na 27,6 bar (400 psi) kako bi se ostvario tlak na dno bušotine ekvivalentan gustoći od približno 1580 kg/m^3 (13,2 ppg), što je za 12 kg/m^3 (0,1 ppg) više od gustoće fluida koja bi uravnotežila najveći očekivani tlak u sloju AR-C. Pri dodavanju šipki vrijednosti protutlaka povećane su na vrijednost od 62 do 65 bar (od 900 do 950 psi). Pri ulasku u AR-C sloj, izvršeno je testiranje vrijednosti slojnog tlaka u dinamičkim uvjetima (engl. *DPPT – dynamic pore pressure test*) na sljedeći način:

- **prva faza:** površinski protutlak ostvaren djelomičnim zatvaranjem sapnice (p_{pt}) smanjivan je u koracima od 1,7 do 3,4 bar (25-50 psi) do potpuno otvorene sapnice, čime se ECD smanjio sa 1560 kg/m^3 (13,02 ppg) na oko 1500 kg/m^3 (12,58 ppg) i pri čemu je bušotina ostala pod kontrolom;
- **druga faza**: zaustavljene su isplačne sisaljke i započet je postupak dodavanja bušaće šipke u bušaći niz, tijekom čega se koristio MPD sustav za nadomještanje gubitaka tlaka u prstenastom prostoru kanala bušotine, kako bi se ekvivalentna statička gustoća isplake (engl. *ESD – equivalent static density*) povećala na oko 1530 kg/m^3 (12,75 ppg). Nakon toga se ponovno se smanjio ostvareni protutlak u intervalima od 3,4 bar (50 psi) sve do nule. Vrijednost ESD-a pala je na oko 1440 kg/m^3 (12,05 ppg).
- Na kraju je napravljen test tijekom kojeg se provjerava pojava dotoka iz kanala bušotine (engl. *flow-check)* pri kojem je bušotina bila stabilna 4 minute, nakon čega je u trip tank registriran dotok od 1,3 m^3 (8 bbl) u vremenskom periodu od 4 do 5 minuta. Minimalna vrijednost ekvivalentne statičke gustoće isplake (ESD) tijekom testa iznosila je 1420 kg/m^3 (11,85 ppg).

Bušotina je tada zatvorena pomoću MPD sapnice pri čemu u prstenastom prostoru registriran tlak od 15,5 bar (225 psi), a pokretanjem pumpi registriran je tlak u bušaćim šipkama od 8,6 bar (125 psi). Proračunata je gustoća isplake za bušenje koja je iznosila iznosi1475 kg/m^3 (12,3 ppg). Nakon iscirkuliravanja dotoka, koristio se protutlak kako bi se bušenje moglo nastaviti uz korištenje iste isplake.

Iz provedenog testa došlo se do važnog zaključka kako je bitno utrošiti dovoljno vremena na postupno smanjenje protutlaka – u opisanom testu utrošeno je 35 minuta na

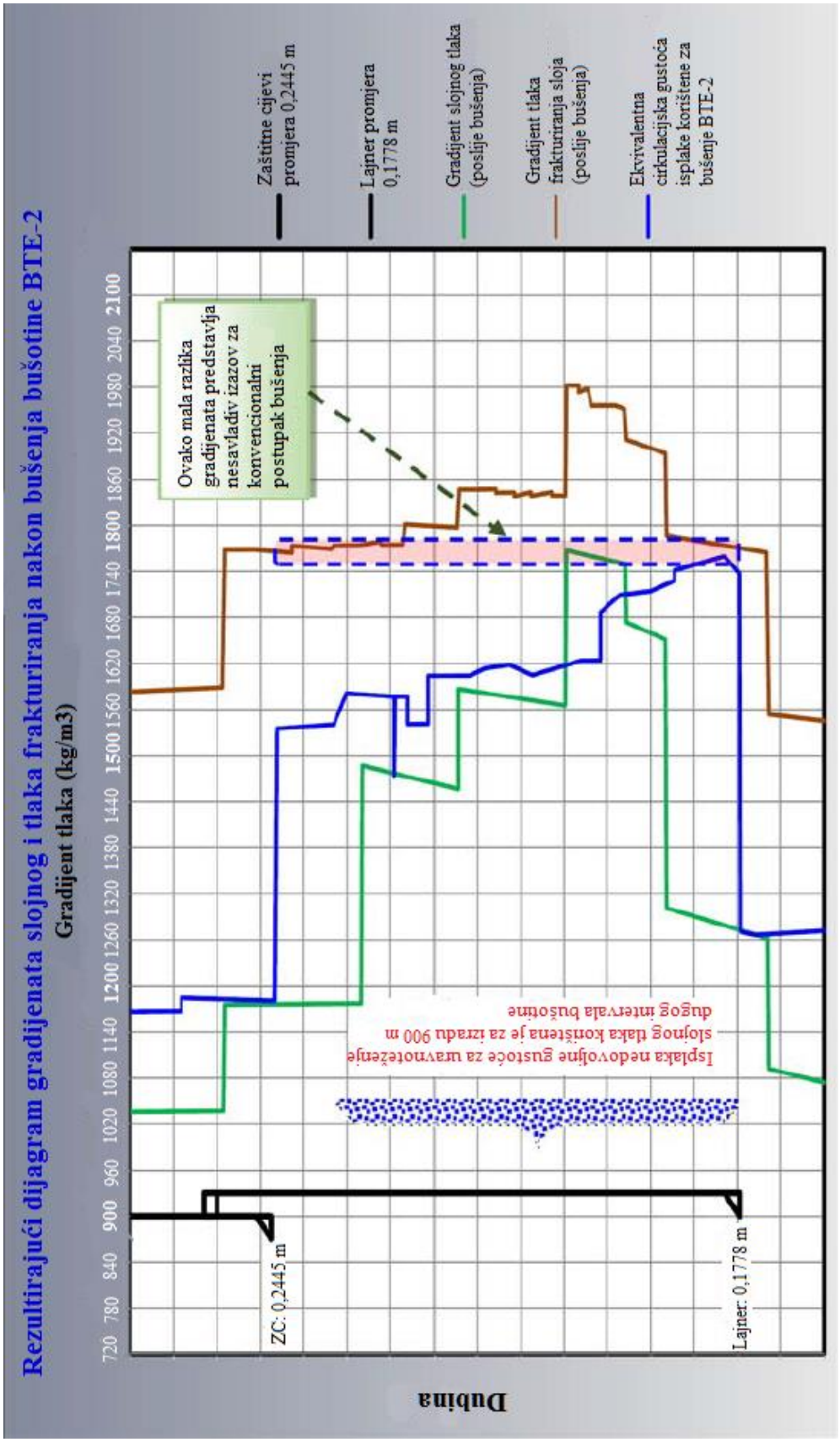
prvo smanjivanje tlaka otvaranjem sapnice, te kasnije 20 minuta na smanjivanje protutlaka, što se pokazalo nedovoljnim za potvrdu nadtlaka nad slojem. Pokazalo se kako je procjena tlaka uistinu bila pogrešna jer je ravnoteža uspostavljena isplakom gustoće 1510 kg/m^3 (12,58 ppg) umjesto očekivanih 1440 kg/m^3 (12 ppg). Drugi je zaključak kako je potrebno stanje pripravnosti za zatvaranje bušotine tijekom konvencionalnog testa provjere dotoka. Zbog nezgodno pozicionirane opreme za MPD, pri izvođenju provjere istječe li fluid iz kanala bušotine nakon isključenja sisaljki (engl. *flow-check*) bio je otežan pristup trip tanku, zbog čega je bilo potrebno više vremena za zatvaranje bušotine za vrijeme dotoka, što je neprihvatljivo.

Kod bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka javlja se pojam dinamičke kontrole tlaka u bušotini, a odnosi se na kontrolu tlaka i sigurno iscirkuliravanje mogućih dotoka iz sloja primjenom sustava za MPD. Najbitnija prednost ovakve kontrole tlaka u bušotini, u usporedbi s konvencionalnom, jest ta da se prestankom cirkulacije ne gubi Δp_{pp} kao dodatni tlak na dno, što pomaže održavanju minimalnog volumena dotoka. Za proceduru kontrole dotoka koriste se operacijske matrice koje inženjeri rade za svaki MPD projekt, te su i za BTE-2 formirane dvije matrice zasnovane na dvije različite vrijednosti gustoće isplake.

Iako je maksimalan predviđeni slojni tlak u proslojku AR-F, iskazan kao ekvivalent gustoće isplake iznosio 1595 kg/m^3 (13,3 ppg), 760 m ispod pete ugrađene kolone zaštitnih cijevi došlo je do dotoka zbog bušenja kroz dodatni neočekivani proslojak AR-G. Bušilo se uz korištenje isplake čija gustoća u statičkim uvjetima nije bila dostatna za kontrolu tlaka u bušotini, uz primjenjeni protutlak od 8,3 bar (120 psi) za postizanje ECD-a od 1625 kg/m^3 (13,55 ppg) kad je MPD operator zamijetio promjene u povratnom protoku iz bušotine, te je zabilježen dodatni dotok od 0,34 m^3 (90 gal) u 7 minuta. Dlijeto je zadignuto od dna bušotine, rotacija šipki se usporila i bušaču je naređeno stanje pripravnosti u slučaju potrebe za konvencionalnim zatvaranjem bušotine. Zatim se pokušalo MPD sustavom staviti bušotinu pod kontrolu, postupno povećavajući protutlak na 17 bar (250 psi), zatim na 24 bar (350 psi) i konačno na 31 bar (450 psi). Budući da dotok nije zaustavljen prešlo se na konvencionalno zatvaranje. U zatvaranju bušotine iskorišten je i sustav za bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka (engl. *MPD assisted shut-in method*) jer se sapnicom MPD sustava i RCD-om održavao protutlak od 55 bar (800 psi) tijekom konvencionalnog „tvrdog“ zatvaranja bušotine. Za iscirkuliravanje dotoka korištena je bušaća metoda, iako se tijekom druge cirkulacije protok preusmjerio kroz MPD sustav. Ukupan dotok izmjeren na trip tanku iznosio je 0,64 m^3 (4 bbl), a potrebna gustoća isplake za gušenje sloja bila je

1700 kg/m^3 (14,2 ppg). Cijeli postupak gušenja i iscirkuliravanje dotoka trajao je 12 sati, te je ukupan dojam nakon operacije da je nevjerojatno brzo uspostavljena kontrola nad bušotinom i uvjeti za nastavak bušenja, s obzirom na dubinu i prethodne uvjete u bušotini. Na slici 6-1 nalazi se kompletan dijagram gradijenata slojnog i tlaka frakturiranja za vrijeme bušenja BTE-2 koji dobro ilustrira koliki je utjecaj MPD metode na uspješnost izrade konkretne bušotine. Iz provedenog postupka su izvučeni sljedeći zaključci:

- iako se koriste mjerila protoka visoke kvalitete, zbog njihove osjetljivosti na promjene tlaka, rezultati mjerenja jako ovise o pomacima sapnice, što može dovesti do krivih zaključaka i odluka;
- zbog pomoći sustava za bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka u zatvaranju bušotine, razlika između gustoće isplake potrebne za uravnoteženje slojnog tlaka i trenutne gustoće isplake u kanalu bušotine (engl. *dynamic kick intensity*) smanjena je na 65 kg/m^3 (0,55 ppg) čime je minimiziran volumen dotoka;
- zbog protupovratnih ventila, tlak je ostao zarobljen u razdjelniku spojenom na stojku, i bilo ga je potrebno ispustiti prije uspostavljanja cirkulacije kako bi se odredio tlak u bušaćim šipkama (engl. *SIDPP – shut-in drillpipe pressure*) jer mijenja njegovu vrijednost za oko 7 bar (100 psi);
- upotreba RCD-a povećala je sigurnost na tornju za vrijeme provedbe postupaka kontrole tlaka i smanjila potrebno vrijeme za njihovo provođenje;
- MPD sustav omogućio je skraćivanje potrebnog vremena za nastavak bušenja.



Slika 6-1. Odnos gradijenata tlaka frakturiranja i slojnog tlaka (određen poslije bušenja) (Emam et al., 2018)

Nakon bušenja do projektirane dubine, sekcija bušotine dovršena je polaganjem lajnera i njegovom cementacijom uz primjenu sustava opreme za bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka (Emam et al., 2018).

6.2. Izrada bušotina Bien Dong 2 i 3 u HPHT uvjetima

Tijekom izrade kanala bušotine Bien Dong 1 odnosno prilikom bušenja sekcije promjera 0,3112 m (12 ¼") došlo je do problema s kontrolom tlaka u bušotini. Ispostavilo se kako je u sloju ispod pete prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi došlo do pojave neočekivano visokog slojnog tlaka dok je tlak frakturiranja razmatranog sloja bio niži od predviđenog. Zbog nižeg gradijenta tlaka frakturiranja bilo je nužno smanjiti gustoću isplake, što je zbog male razlike između dvaju gradijenata dovelo do problema s dotokom fluida u bušotinu. Problem je riješen ugradnjom proširivog lajnera (engl. *Expandable liner*) kako bi se premostio problematični sloj. U nastavku bušenja dolazilo je do velikih problema s gubitkom isplake, uslijed prevelikog ECD-a. Nakon završetka izrade kanala, inženjeri su zaključili kako je korištena MPD tehnologija dobro rješenje za buduće bušotine u sličnim okolnostima jer bi se izbjegla većina problema vezanih uz kontrolu tlaka u bušotini i značajno skratilo vrijeme izrade kanala.

Temeljem podataka dobivenih izradom bušotine BD-1, poznato je kako je najveći očekivani slojni tlak pri bušenju sekcije promjera 0,3112 m (12 ¼") odgovarao gustoći isplake od 2075 kg/m^3 (17,3 ppg), dok je predviđeni tlak frakturiranja bio ekvivalentan gustoći isplake od 2170 kg/m3 (18,1 ppg) na razmatranoj dionici kanala bušotine. Provedena je simulacija kako bi se odredila potrebna gustoća isplake i odabrana je isplaka gustoće 2075 kg/m^3 (17,3 ppg) koja će cirkulirati dobavom od 0,053-0,06 m^3/s (850-950 gpm). Tijekom stanke u radu sisaljki, na površini će djelovati protutlak od 17 bar (250 psi). Sljedeći problematični sloj očekivan je tijekom bušenja dionice kanala bušotine promjera 0,2159 m (8 ½"), gdje se očekuje slojni tlak ekvivalentan onome koji bi se ostvario djelovanjem stupca isplake gustoće 2050 kg/m^3 (17,1 ppg) na razmatranoj dubini i tlak frakturiranja ekvivalentan stupcu isplake gustoće 2200 kg/m^3 (18,3 ppg). Također je simulacijom odabrana gustoća isplake 2060 kg/m^3 (17,2 ppg) i dobava od 100 m^3/h (450 gpm). Povećanje dobave pumpe iznad planirane vrijednosti dovelo bi do povećanja vrijednosti ekvivalentne cirkulacijske gustoće isplake što bi rezultiralo frakturiranjem stijene. Tijekom prestanka cirkulacije s površine će se ostvariti protutlak od 14 do 17 bar (200-250 psi). Tijekom

bušenja korišten je automatski razdjelnik podesive sapnice kako bi kontrola tlaka na dnu bila čim preciznija (Singh et al., 2018).

Bušotine BD-2 i BD-3 izrađene su bez većih problema uz pomoć MPD tehnologije. Uspješno bušenje rezultiralo je sljedećim saznanjima (Gedge et al., 2014):

- za HPHT uvjete bolje je koristiti prirodnu nego nitrilnu gumu za brtvene elemente RCD-a;

  Temperature bušenih formacija iznosile su do 190 °C, zbog čega je temperatura isplake u optoku rasla do 85 °C, što je imalo negativan utjecaj na brtvene elemente
  RCD-a. Zatim se prešlo na korištenje nitrilne gume koja je namijenjena za uvjete visoke temperature i uljne isplake, no rezultati su pokazali kako se prirodna guma puno bolje ponašala u ovakvim radnim uvjetima.

- uz vrstu gume, drugi kritičan faktor za trajnost brtvenih elemenata RCD-a je poravnanje niza bušaćih šipki i vršnog pogona;

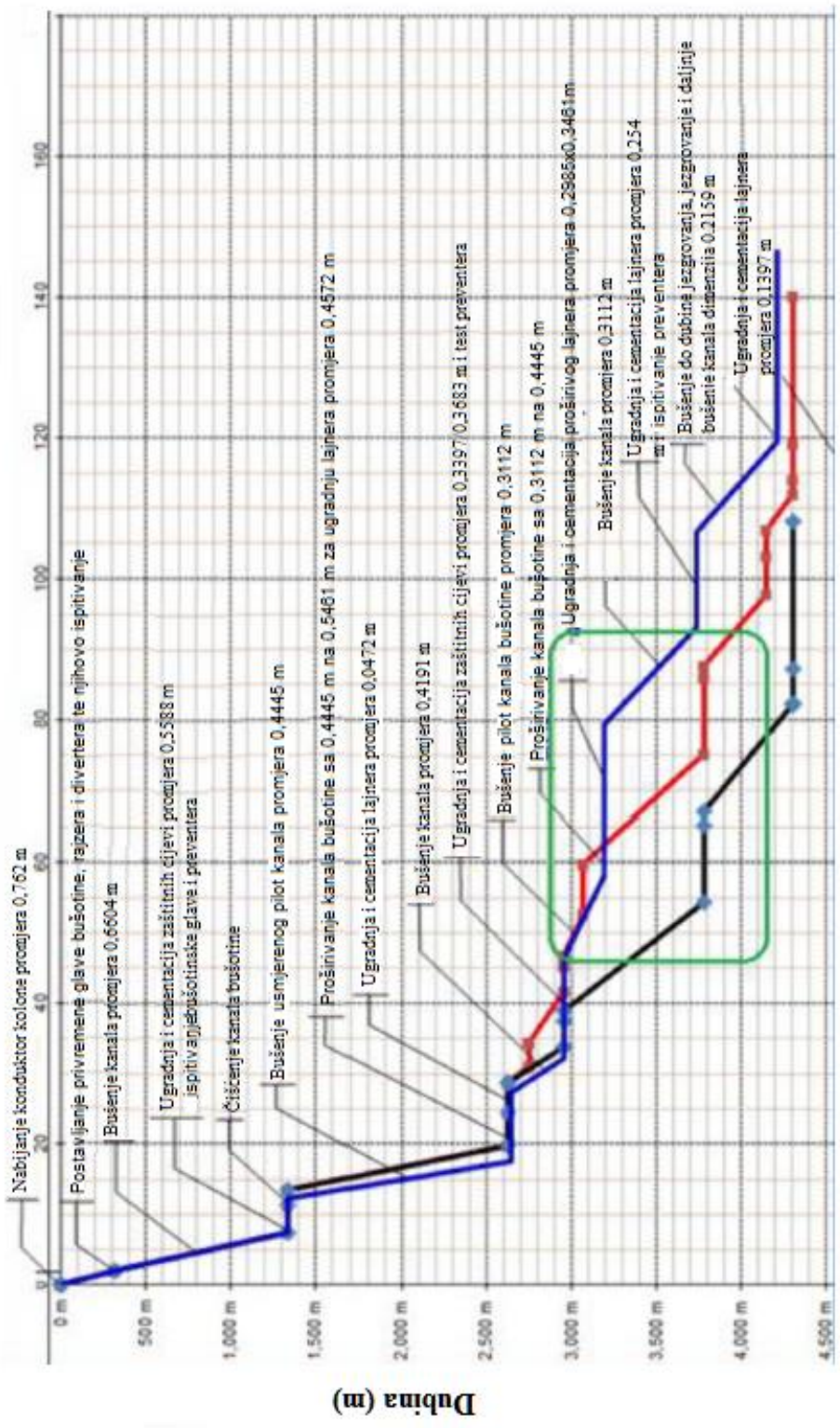
  Stručnjaci, poučeni ovim iskustvom, preporučaju često provjeravanje poravnanja alatki i korekcije istog tijekom izrade kanala, za produljeni životni vijek brtvenih elemenata RCD-a. Ovi su se uvidi pokazali korisnima već pri sljedećoj kampanji izrade HPHT bušotina u Vijetnamu gdje nije bilo problema s brtvenim elementima RCD-a.
- uvjeti visoke temperature i tlaka uzrokuju efektivno smanjenje gustoće isplake;

  Radi se o razlikama od oko 12 do 18 kg/m^3 (0,1 do 0,15 ppg) pri dubinama većim od 3000 m, no i takvo malo odstupanje ima veliku važnost u slučaju vrlo male razlike gradijenata pornog tlaka i tlaka frakturiranja naslaga. Ovaj efekt nije prouzročio probleme tijekom bušenja u konkretnom slučaju, već se samo napominje zbog nadopune teoretskog znanja o MPD-u koje se proširuje svakom njegovom primjenom.
- iznimno je važno razlikovati pojavu promjene volumena kanala bušotine uslijed promjene tlaka („ballooninga“) i dotok slojnog fluida u bušotinu.

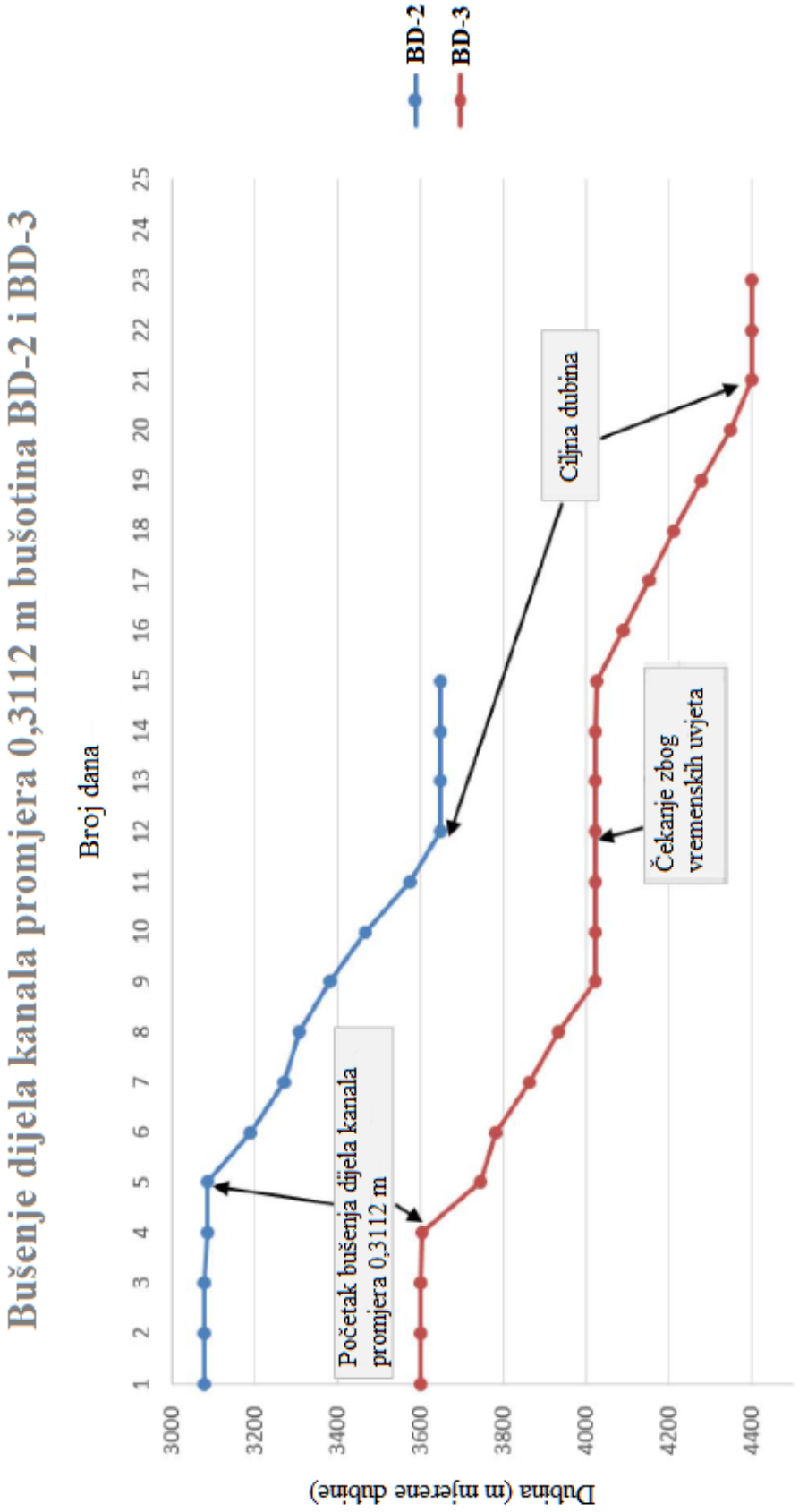
„Ballooning“ je ranije pojašnjena pojava do koje dolazi uslijed stvaranja mikro fraktura u sloju tijekom bušenja zbog većeg ECD-a i posljedičnog tlaka od tlaka frakturiranja. Nakon što se sisaljke ugase, i ekvivalentna cirkulacijska gustoća se smanji na statičku vrijednost dolazi do zatvaranja mikro fraktura i povratka isplake u kanal bušotine

što se ponekad krivo tumači kao dotok. U nekoliko slučajeva došlo je do istjecanja isplake iz bušotine nakon zaustavljanja sisaljki, no bušač je prepoznao da se ne radi o dotoku, te nije došlo do problema ili zastoja do kojih može doći ako se pogrešno procijeni situacija i primijene postupci kontrole tlaka u bušotini.

Usporedba slike 6-2 i 6-3 ilustrira koliko je manje vremena bilo potrebno za izradu kanala bušotina BD-2 i BD-3 u odnosu na bušotinu BD-1 , te izostanak poteškoća u odnosu na konvencionalno bušenje u istim uvjetima. Dok je za izradu kanala BD-1 bilo potrebno 46 dana, bušotina BD-2 dovršena je za 10 dana, a BD-3 za 14 dana (Singh et al., 2018).



Slika 6-2. Realizirani vremenski raspored radova na izradi bušotine BD-1 (Singh et al., 2018)



Slika 6-3. Usporedba vremena potrebnog za izradu kanala bušotine promjera 0,3112 m na bušotinama BD-2 i BD-3 (Singh et al., 2018)

6.3. Metoda bušenja uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine uz korištenje isplake plinizirane dušikom

Dosad spomenuti primjeri imali su, kao i polje u Ujedinjenim Arapskim Emiratima pod upravljanjem tvrtke ADNOC, problema s malom razlikom tlaka između gradijenata slojnog i tlaka frakturiranja. No, u sloju „A“ iscrpljenog vapnenačkog ležišta u UAE kontraktori su se godinama borili sa rastućim problemom gubitaka isplake zbog pada slojnog tlaka ispod vrijednosti hidrostatskog tlaka. Gubici isplake redovito su uzrokovali probleme vezane uz kontrolu tlaka u bušotini i diferencijalne prihvate niza alatki, što je stučnjake dovelo do zaključka kako je slojni tlak niži od hidrostatskog. Korištenje dušika omogućilo je smanjenje gustoće isplake ispod najmanje moguće gustoće jednofazne isplake na bazi vode. Stoga je planirani pristup za izradu oko 885 m (2900 ft) dugog, problematičnog dijela kanala bušotine promjera 0,1524 m (6"), uključivao korištenje metode bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka uz korištenje isplake plinificirane dušikom (engl. *NMPD – Nitrified Managed Pressure Drilling*) za bušenje blizu uvjeta ravnoteže uz korištenje hidrauličke sapnice i separatora (zbog moguće pojave ugljikovodika).

Simulacijom hidrauličkih uvjeta pri višefaznom protjecanju određene su optimalne dobave isplake na bazi vode od 57 m^3/h (250 gpm) i dušika od 850 do 1050 m^3/h (500-650 scfm). S tim parametrima očekivalo se bušenje blizu granice ravnoteže s minimalnim gubicima koji nisu trebali uzrokovati dotok slojnog fluida u bušotinu.

Modeliranje višefaznog protoka najzahtjevniji je faktor u projektiranju NMPD projekta. Potrebno je odrediti ekvivalentnu cirkulacijsku gustoću, brzine protjecanja u prstenastom prostoru, procjenu čišćenja dna od krhotina i tlakove utiskivanja. Za određivanje ECD-a važni su sljedeći parametri (Almetayev et al., 2018):

- gustoća isplake, zbog ostvarivanja hidrostatskog tlaka;
- dobava sisaljke, zbog dodatnog tlaka na dno uslijed otpora protjecanju isplake u prstenastom prostoru;
- površinski protutlak, za povećanje tlaka na dno i kompenzaciju dodatnog tlaka na dno bušotine koji nastaje uslijed gubitaka tlaka u prstenastom prostoru tijekom mcirkulacije isplake, tijekom prestanka cirkulacije isplake;
- reološka svojstva isplake i
- potrebna dobava dušika.

Procijenjena je vrijednost slojnog tlaka ekvivalentna gustoći od 800 kg/m^3 (50 pcf), a maksimalna očekivana 960 kg/m^3 (60 pcf), stoga se za modeliranje uzima najgori slučaj i željena vrijednost ECD-a od 1060 kg/m^3 (66 pcf). Simulirano je održavanje ECD-a između 960 kg/m^3 (60 pcf) i 1120 kg/m^3 (70 pcf) tijekom bušenja, od čega 1040 kg/m^3 (65pcf) čini hidrostatski tlak isplake, čime se ostvaruje mali pretlak na formaciju. To su projektirane vrijednosti koje se lako korigiraju po dobivanju podataka iz bušotine, a mogući gubici isplake se kontroliraju utiskivanjem veće količine dušika u bušotinu, što smanjuje ECD. Bušenje je ipak na kraju odrađeno uz održavanje ECD-a na vrijednosti 850 kg/m^3 (53 pcf).

Za bušenje planirane etape horizontalnog dijela kanala bušotine od 1516 m (4975 ft) do 2301 m (7550 ft) mjerene duljine kanala bušotine trebalo je 68,5 sati, s prosječnom dobavom dušika od 0,1389 m^3/s (300 scfm) i dobavom isplake 0,0153 m^3/s (240 gpm). Prosječni tlak utiskivanja dušika na razdjelniku stojke bio je od 108 barg (1580 psig) do 114 barg (1650 psig). Održavanje ove vrijednosti konstantnom pokazalo se kao važna zadaća pri bušenju kako bi alati za mjerenje parametara tijekom bušenja (MWD/LWD) imali točna očitanja. Tijekom bušenja ove dionice ostvarena je srednja brzina bušenja od 10 m/h (33,2 ft/h).

Prednosti proizašle iz upotrebe NMPD-a u konkretnom slučaju su (Almetayev et al., 2018):

- bolja kontrola gubljenja isplake čime se značajno reduciraju troškovi isplake i smanjuje neproduktivno vrijeme izazvano procesima uspostavljanja kontrole tlaka u bušotini i čekanjem na dopremu vode potrebne za pripremanje isplake;
- adekvatno planiranje i održavanje svojstava isplake smanjuju gubitke isplake, a time i vrijeme potrebno za čišćenje kanala bušotine od krhotina zaostalih u kanalu bušotine zbog gubitka isplake u sloj;
- poboljšanje sigurnosti na tornju koje je postignuto usmjeravanjem izlaznog toka isplake iz bušotine u zatvoreni sustav separacije, čime postoji mogućnost usmjeravanja plina (u slučaju totalnih gubitaka isplake) dalje od podišta tornja i potiskivanje ležišnog fluida u sloj (engl. *bullheading*), što može biti potrebno prije prelaska na „Mud Cap“ bušenja uz primjenu dodatnog tlaka na površini.

Preporuke proizašle uz primjene ove tehnologije na konkretnom polju su sljedeće (Almetayev et al., 2018):

- dubinski bušaći sklop (engl. *BHA – bottomhole assembly*) mora biti dizajniran u skladu s očekivanim omjerima isplake i dušika, kako bi se poboljšao prijenos signala s dubinskih uređaja koji obavljaju različita mjerenja tijekom bušenja, s obzirom da su prikupljeni podaci najvrjednije informacije za planiranje sljedećih projekata;
- s obzirom da se radilo o zatvorenom sustavu cirkulacije bez trip tanka, bilo je potrebno dodati mjerilo protoka u MPD sustav sa svrhom čim ranijeg raspoznavanja dotoka te čim boljeg utvrđivanja i kvantifikacije gubitaka isplake.

Iako je opisani slučaj bila prva primjena NMPD-a u Emiratima, nije došlo do nikakvih poteškoća. Smanjenjem cirkulacijskog tlaka na dnu s 48 na 17 bar (700 na 250 psi) smanjilo se i neproduktivno vrijeme od tri dana koje bi bilo potrebno za dopremu vode za pripremu ispkale kojom bi se nadoknadili gubitci isplake (Almetayev et al., 2018). Treba uzeti u obzir da je vrlo važna kakvoća dušika koji se utiskuje, jer je npr. u Kuvajtu, gdje je 5% utisnutog plina činio kisik, došlo do nastanka jako korozivne sredine na dnu bušotine koja se nije mogla ublažiti nijednim poznatim postupkom za smanjenje korozije što je rezultiralo velikim problemima pri izradi kanala bušotine (Hussain et al., 2014).

7. „MUD CAP“ METODA BUŠENJA

Druga metoda bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka detaljnije obrađena u ovom radu je „Mud Cap“ metoda bušenja. Po nekim klasifikacijama, danas se samo bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu dodatnog tlaka na statički fluid u prstenastom prostoru (PMCD) smatra jednom od četiri metode MPD-a, no načelo potječe iz općenite „Mud Cap“ metode te će stoga ona biti temelj ovog poglavlja rada.

Prema definiciji IADC-a, „Mud Cap“ (engl. *MCD – Mud Cap Drilling*) je proces bušenja u kojem se razina isplake u prstenastom prostoru održava na određenoj razini ispod površine, u svrhu održavanja stabilnosti kanala bušotine i održavanja bušotine pod kontrolom. Nema povratka isplake na površinu, a održavanje razine isplake u kanalu postiže se utiskivanjem isplake u prstenasti prostor. Najpoznatije su varijante MCD-a bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu dodatnog tlaka na statički fluid u prstenastom prostoru (engl. *PMCD - Pressurized Mud Cap Drilling*) i bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu statičkog fluida u prstenastom prostoru (engl. *FMCD - Floating Mud Cap Drilling*). Iako se u navedenoj definiciji navode samo dvije varijante MCD-a, zadnjih dvadeset godina razvijaju se još barem dvije metode – metoda bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz konstantno utiskivanje fluida u bušaći niz (engl. *DMCD – Dynamic Mud Cap Drilling*) i bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz povećanu kontrolu parametara (engl. *CMC - Controlled Mud Cap*) koje će biti ukratko opisane u nastavku.

Preciznije rečeno, MCD je metoda bušenja u kojoj se isplaka (engl. *Mud Cap fluid*) i voda utiskuju u prstenasti prostor i kroz niz bušaćih alatki tijekom bušenja kroz prirodno raspucane stijene ili uslojene formacije s različitim gradijentima slojnog tlaka i tlaka frakturiranja. Ova se metoda primjenjuje kad god je otežano ili nemoguće održavanje cirkulacije isplake te se javljaju učestali problemi s kontrolom tlaka i gubicima isplake, a sve s ciljem smanjenja utrošenog vremena i novca pri bušenju (Rehm et al., 2008).

7.1. Bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu statičkog fluida u prstenastom prostoru (engl. *FMCD – Floating Mud Cap Drilling*)

Ranije obrazložena varijanta bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka na dno bušotine nastala je kao rezultat instinktivnog razvoja konvencionalnog bušenja, uz dodatno

unapređenje već poznatih načela i dodatnu kontrolu različitih parametara. MCD metoda obuhvaća puno veće promjene u samom procesu bušenja, ali manje potrebe razvoja tehnologije, zbog čega se razvija i koristi već dugi niz godina.

Prvi se put pojam MCD koristio pri bušenju sloja „Austin Chalk“ u Teksasu, u SAD-u, gdje se pridobivanje ugljikovodika odvijalo kroz horizontalne bušotine u raspucanim karbonatima. Pridobivanje ugljikovodika se odvijalo kroz velike prirodne frakture, koje su uzrokovale probleme pri bušenju. Nakon što se materijalima za sprečavanje gubljenja isplake (engl. *LCM – lost circulation materials*) nije uspjelo spriječiti njezino gubljenje, nastavilo se s bušenjem u uvjetima podtlaka, sve do pojave višestrukih pukotina na kratkom dijelu kanala bušotine. S obzirom da se ležište nalazi na velikoj dubini, te se bušilo i kroz zone visokog tlaka, to je dovodilo do čestih dotoka slojnog fluida u kanal bušotine uslijed gubitaka isplake. Zbog učestalih problema s kontrolom tlaka značajno se produljilo vrijeme izrade bušotine, a gubici velikih količina isplake povećavali su troškove, što je potaknulo inženjere na potragu za alternativnim metodama bušenja kojima bi se riješili spomenuti problemi.

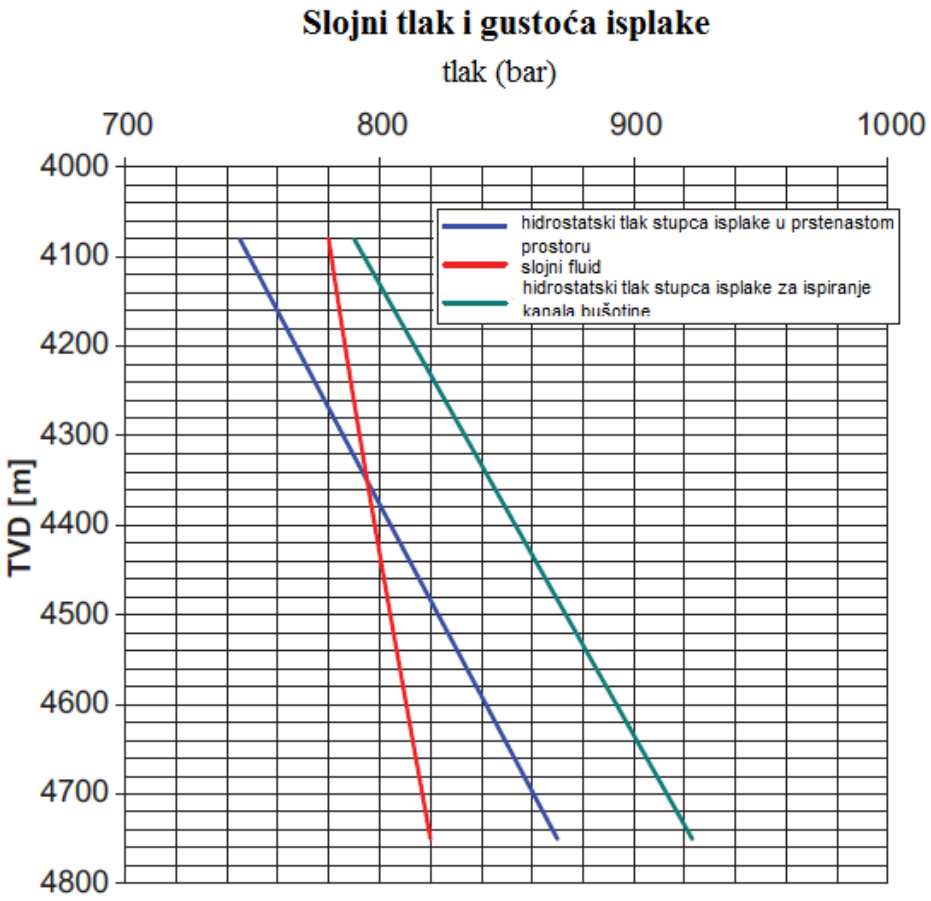
Razvoj MCD-a omogućio je utiskivanje otežane isplake u prstenasti prostor bušotine zatvorene pomoću rotirajuće bušaće glave do uspostave ravnoteže (engl. *Bullheading*), nakon čega se bušenje nastavlja uz utiskivanje vode kroz niz bušaćih alatki bez povratka na površinu. Sapnica RCD-a pritom je u potpuno zatvorenom položaju, a koristi se isplaka 240 do 480 kg/m^3 (2-4 ppg) veće gustoće od potrebne za uravnoteženje povećanja tlaka u prstenastom prostoru uslijed povećanja slojnog tlaka (Colbert i Medley, 2002). Utisnuta voda naziva se „žrtvenim“ fluidom (engl. *sacrificial fluid*) jer se utiskuje bez očekivanja njenog povratka na površinu. Po završetku bušenja primjenom ove metode, primijećeno je kako je gubitak isplake puno manji nego upotrebom konvencionalnog bušenja, kao i potrebno vrijeme za izradu kanala bušotine. Krhotine razrušenih stijena završile su u frakturama zajedno s utisnutom vodom, čija je primarna namjena pokretanje motora i MWD-a (engl. *measurement while drilling*) te hlađenje i čišćenje dlijeta.

Ova najstarija i najjednostavnija MCD metoda naziva se bušenjem u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu statičkog fluida u prstenastom prostoru (engl. *FMCD - Floating Mud Cap Drilling*). Razina isplake, upotrebom ove metode je na nekoj dubini, koja odgovara uspostavljenoj ravnoteži s slojnim tlakom najniže raskrivene frakturirane formacije. Dodatna otežana isplaka utiskuje se u prstenasti prostor kanala po potrebi, a ukoliko je manji slojni tlak i dostupna dostatna količina vode, može se

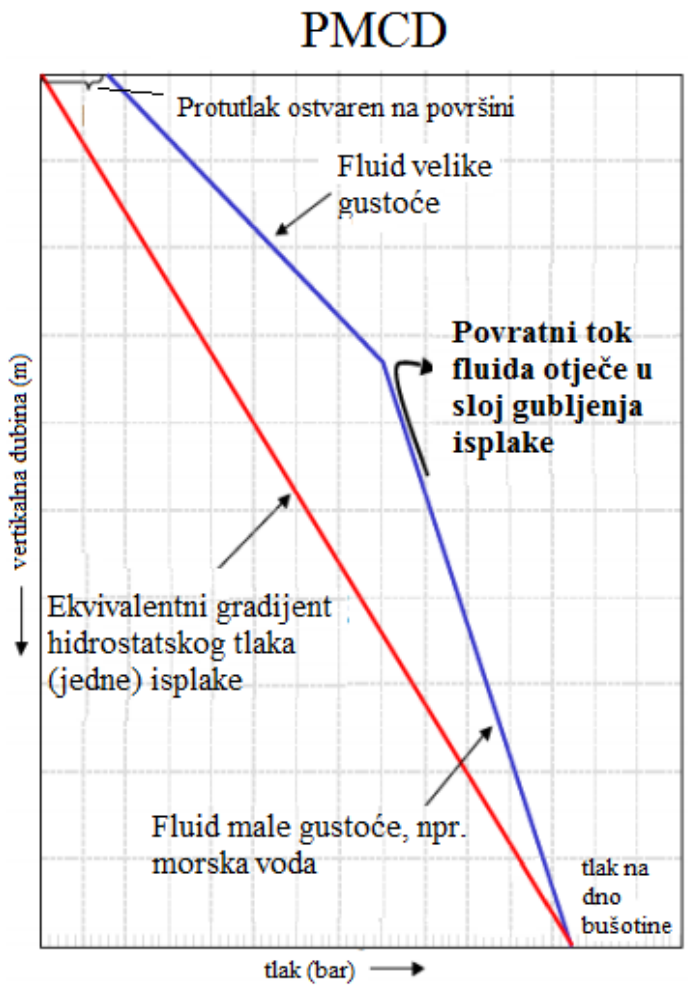
kontinuirano utiskivati i čista voda. Tlak u bušotini bit će pod kontrolom sve dok se otežani fluid utiskuje u prstenasti prostor dovoljnom dobavom za potiskivanje pridobivenih slojnih fluida natrag u sloj. Kontinuirano utiskivanje vode opravdano je jedino kad su dostupne neograničene količine vode na lokaciji, ili je potrebno bušotinu dovršiti u kratkom vremenskom roku. Prednost FMCD-a jest u tome što zahtijeva vrlo malo površinske opreme, samo sisaljku za utiskivanje u prstenasti prostor i rotirajuću bušaću glavu (RCD), a tek u uvjetima visokog tlaka dolazi do potrebe za opremom prilagođenom za takve uvjete, uključujući i zamjenu stojke i tlačnih vodova isplačnog sustava (Rehm et al., 2008). U današnje se vrijeme i pri primjeni FMCD metode može pratiti vrijednost tlaka ispod RCD-a, kako bi se osigurao pravovremeni prijelaz na bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu dodatnog tlaka na statički fluid u prstenastom prostoru (PMCD), ukoliko dođe do potrebe za time (Muis et al., 2016).

7.2. Bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu dodatnog tlaka na statički fluid u prstenastom prostoru (engl. PMCD – *Pressurized Mud Cap Drilling*)

Kad se uvjeti zakompliciraju, bušenjem vrlo debelih raspucanih formacija, dolazi do nemogućnosti održavanja ravnoteže između tlakova u kanalu bušotine sa slojnim tlakovima u pojedinim frakturiranim dijelovima kanala bušotine koji se nalaze na određenoj udaljenosti. Situacija se dodatno usložnjava ako u ležištu postoji prisutnost kiselih plinova. Tada nepoznata razina isplake u prstenastom prostoru predstavlja značajan rizik za sigurnost radnika na postrojenju i okoliš, zbog toga što su dotoci u bušotinu uvijek iznenadni i siloviti. Kako bi se mogao kontinuirano pratiti tlak na površini, razvijena je metoda bušenja u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu dodatnog tlaka na statički fluid u prstenastom prostoru (engl. *PMCD – Pressurized Mud Cap Drilling*). Ona se naziva još i bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake sa statičkim fluidom male gustoće (engl. *Light Annular Mud Cap*) jer podrazumijeva utiskivanje isplake u prstenasti prostor čija gustoća nije dovoljna za uravnoteženje slojnog tlaka (Rehm et al., 2008). Iako je gustoća „Mud Cap“ isplake manja od one koja bi se upotrebljavala za FMCD, njezina je viskoznost značajno veća, što omogućuje da poput „kape“ ostane iznad drugih fluida u prstenastom prostoru (Al-Amri et al., 2016). Problem i rješenje koje predstavlja PMCD ilustriraju grafovi na slikama 7-1 i 7-2.



Slika 7-1. Usporedba promjene slojnog tlaka i tlaka stupca isplaka različitih gustoća kod PMCD-a (Masi et al., 2011)

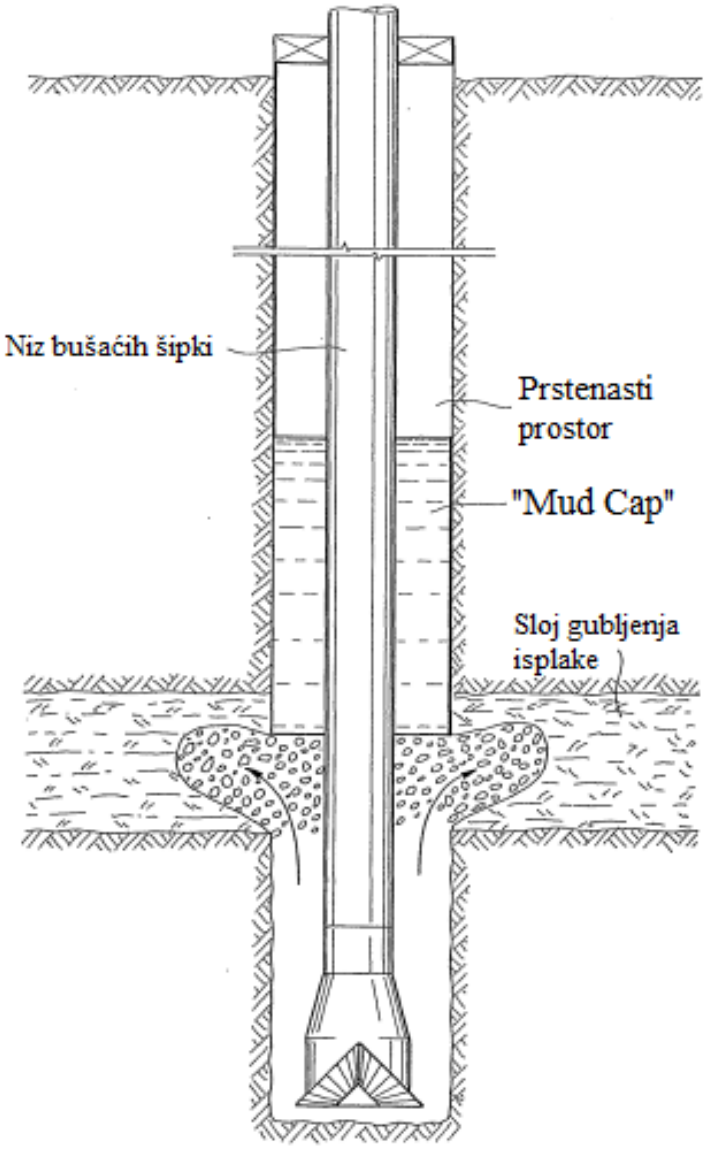


Slika 7-2. Usporedba promjene slojnog tlaka i tlaka stupca isplaka različitih gustoća kod PMCD-a uz primjenu tlaka na prstenasti prostor na ušću bušotine (Rohani, 2011)

Bušenje se odvija u kanalu bušotine zatvorenom pomoću RCD-a, a površinski tlak u prstenastom prostoru koristi se kao indikator promjena u bušotini. Statički tlak u prstenastom prostoru na površini je razlika slojnog tlaka na najplićoj frakturi i hidrostatskog tlaka stupca isplake. Dinamički tlak u prstenastom prostoru, odnosno tlak za vrijeme rada sisaljki, obično je nešto viši od statičkog, zbog otpora protjecanju. Porast tlaka na površini indikator je migracije plina prema površini i njegove odgovarajuće ekspanzije. Stoga se, u slučaju porasta tlaka većeg od unaprijed određene vrijednosti, dodatna isplaka manje gustoće od ranije korištene isplake za bušenje utiskuje se u prstenasti prostor kako bi potisnula plin i zagađenu isplaku natrag u sloj, i vrijednost površinskog tlaka se vrati na onu od prije dotoka (Slika 7-3). Utiskivanjem isplake u prstenasti prostor pod tlakom postiže se potiskivanje dotoka u sloj s najmanjim otporom (Nas et al., 2009). Upravo ova mogućnost

čini glavnu razliku PMCD i FMCD metode te osigurava kontrolu nad bušotinom i dotokom nepoželjnih fluida na površinu. Prema nekim stručnjacima, ova je metoda omogućila bušenje vrlo debelih, raspucalih, slojeva zasićenih kiselim plinovima koji su ranije predstavljali nesvladani izazov (Rehm et al., 2008).

Zbog praćenja i održavanja željene vrijednosti tlaka u prstenastom prostoru, PMCD se smatra kompliciranijom od prethodne metode, no na račun toga manje rizičnom (Goodwin et al., 2014).



Slika 7-3. Pojednostavljena ilustracija djelovanja PMCD metode bušenja (Hannegan, 2011)

7.2.1. Primjer proračuna tlakova i gustoća za potrebe izrade kanala bušotine korištenjem FMCD i PMCD metode

Postupke proračuna koji se razlikuju u dvije navedene metode najlakše je opisati pomoću praktičnog primjera. Primjer je preuzet iz Rehm et al., 2008, a prikazani proračun je minimalno izmijenjen i prilagođen za primjenu u SI jedinica.

Ulazni podaci odnose se na vertikalnu bušotinu kojom se nastoji probušiti problematični karbonatni interval:

- zaštitne cijevi nominalnog vanjskog promjera 0,1937 m (7 ⅝") i jedinične mase 58 kg/m (39 lb/ft), ugrađene do dubine od 2745 m;
- promjer kanala u nastavku: 0,1651 m (6 ½ ");
- dobava isplačne sisaljke: 51 m^3/h (225 gpm);
- krovina ležišta: 2740 m;
- ležišni (slojni) tlak: 390 bar na razini krovine ležišta 2740 m;
- slojni fluid: plin, pretpostavljeni hidrostatski gradijent 2250 Pa/m;
- dubina prve frakture: 2780 m
- druga fraktura: 2840 m
- treća fraktura: 3000 m.

7.2.1.1. Proračun tlakova i gustoća fluida za primjenu kod FMCD metode bušenja

Zaštitne cijevi promjera 0,1937 m (7 ⅝") ugrađene su i cementirane unutar kanala bušotine čije je dno smješteno 5 m unutar samog ležišta. Potrebna gustoća isplake na razini ležišnog sloja računa se prema slojnom tlaku pomoću izraza prikazanog jednadžbom 7-1:

$$\rho = \frac{p_{sl}}{g\ x\ h} = \frac{39\,000\,000\ Pa}{9{,}80665\ \frac{m}{s^2} x\ 2740\ m} = 1451{,}4\ kg/m^3 \qquad (7\text{-}1)$$

Gdje su:

p_{sl} = ležišni (slojni) tlak na razini krovine (Pa)

g = ubrzanje sile teže (m/s^2)

h = dubina na kojoj se nalazi krovina ležišta (m)

Stoga se bušenje nastavlja proračunatom gustoćom isplake na bazi vode. Bušenje se odvija bez poteškoća do pojave prve frakture, a sa svakom sljedećom frakturom se situacija

dodatno komplicira. Tablica 7-1 prikazuje odgovarajuće vrijednosti slojnog tlaka za svaku frakturu i potrebne gustoće isplake za bušenje tih dijelova kanala, na temelju prikazanog proračuna za prvu frakturu:

- slojni tlak u frakturi izračunat je na temelju njezine dubine i gradijenta hidrostatskog tlaka slojnog fluida pomoću jednadžbe 7-2:

$$p_{f1} = p_{sl} + \left[(h_2 - h_1) \times G_{p_h}\right] = 39\,000\,000 + [(2780 - 2740) \times 2250] = 390{,}9 \times 10^5 Pa \quad (7\text{-}2)$$

  Gdje su:

  p_{f1} = vrijednost tlaka na visini prve frakture (Pa)

  h_1 = dubina prve frakture (m)

  h_2 = dubina druge frakture (m)

  Gp_h = pretpostavljeni gradijent hidrostatičkog tlaka (Pa/m)

- a odgovarajuća gustoća isplake koja u statičkim uvjetima drži bušotinu pod kontrolom pomoću jednadžbe 7-3:

$$\rho = \frac{p_{sl}}{g \times h_2} = \frac{39\,090\,000}{9{,}80665 \times 2780} = 1433{,}8\ kg/m^3 \quad (7\text{-}3)$$

Tablica 7- 1. Vrijednosti slojnog tlaka i odgovarajuće gustoće isplake na razini pojedine frakture (Rehm et al., 2008)

	Slojni tlak (bar)	Odgovarajuća gustoća isplake za uravnoteženje slojnog tlaka (kg/m^3)
Prva fraktura	390,9	1433,8
Druga fraktura	392,3	1408,4
Treća fraktura	395,9	1345,5

Iz istaknutih podataka vidljivo je kako nije moguće kroz ovakvo ležište bušiti upotrebom konvencionalne metode bušenja jer se adekvatnim smanjenjem gustoće isplake za sljedeću frakturu gubi kontrola nad prethodnom. Nešto bi jednostavnija situacija bila kad se frakture ne bi nalazile u ciljanom sloju, te bi se mogli koristiti materijali za čepljenje zona gubljenja isplake. No, u ovakvim uvjetima to je kontraproduktivno jer se pridobivanje ugljikovodika odvija upravo kroz prirodne frakture u karbonatnim ležištima.

U primjeru je pretpostavka da se kod nailaska na prvu frakturu počinje s korištenjem konvencionalne MPD metode (CBHP), a tek kod druge frakture s FMCD metodom. Kad se

kod druge frakture dogode značajni gubici, kako bi se smanjila potrebna količina isplake za održavanje kontrole tlaka, utiskuje se u prstenasti prostor isplaka gustoće između 1800 i 2150 kg/m^3 sve do prestanka cirkulacije u prstenastom prostoru pri površini. Iako se može reći da je bušotina pod kontrolom, moguća je međusobna komunikacija slojeva u dubljim dijelu kanala bušotine.

Kako bi se nastavilo s bušenjem, potrebno je započeti s cirkulacijom žrtvenog fluida (vode), a cirkulacijski tlak mora biti dovoljan da svlada razliku hidrostatskog tlaka vode i slojnog tlaka. Ukupna vrijednost cirkulacijskog tlaka je suma spomenute razlike tlakova i svih gubitaka u sustavu i nizu bušaćih alatki (uključujući i dlijeto).

Tijekom izvlačenja alatki, isplaka originalno proračunate gustoće utiskuje se u prstenasti prostor u količinama da nadomjesti volumen čelika izvađenih alatki. Isplaka veće gustoće utiskuje se po potrebi u slučaju pojave dotoka. Nakon izvlačenja cijelog niza alatki, zatvara se čeljusni preventer za zatvaranje punog promjera kanala bušotine, i prati se tlak u prstenastom prostoru. U nastavku operacija, prije otvaranja preventera, utiskuje se dodatni obrok isplake za gušenje kako bi se osigurala sigurnost na postrojenju prije ponovnog postavljanja RCD-a.

7.2.1.2. Proračun tlakova i gustoća fluida za primjenu kod PMCD metode bušenja

Za isti, ranije naveden praktični primjer, dan je proračun i za provođenje postupka bušenja primjenom PMCD metode. Ukoliko je u razini prve frakture slojni tlak 390,9 bar, a želi se primjenjivati protutlak na površini do 10 bar, mijenja se potrebna gustoća isplake za bušenje prema izrazu prikazanom jednadžbom 7-4:

$$\rho = \rho_1 - \frac{p_{pt}}{g \times h_2} = 1433{,}8 - \frac{1\,000\,000}{9{,}80665 \times 2780} = 1397{,}1\ kg/m^3 \qquad (7\text{-}4)$$

Gdje su:

ρ = nova potrebna gustoća isplake (kg/m^3)

ρ_1 = gustoća isplake potrebna u istim uvjetima, kad se ne bi primjenjivao dodatni tlak na statički fluid (kg/m^3)

p_{pt} = vrijednost protutlaka koji se na površini primjenjuje na statički fluid (Pa)

Nova isplaka utiskuje se kroz vod za gušenje u prstenasti prostor sve dok u potpunosti ne zamijeni prijašnju. U nastavku bušenja tlakovi se ponašaju stabilno, no ležišni fluid migrira prema površini zbog svoje manje gustoće u odnosu na isplaku. Na površini se

bilježi porast tlaka u prstenastom prostoru bez pratećeg povećanja tlaka u nizu bušaćih alatki. Bilježenje ovakvog porasta omogućuje rano otkrivanje dotoka iz ležišta, a u tom slučaju se dodatna isplaka utiskuje u prstenasti prostor i dotok potiskuje natrag u sloj.

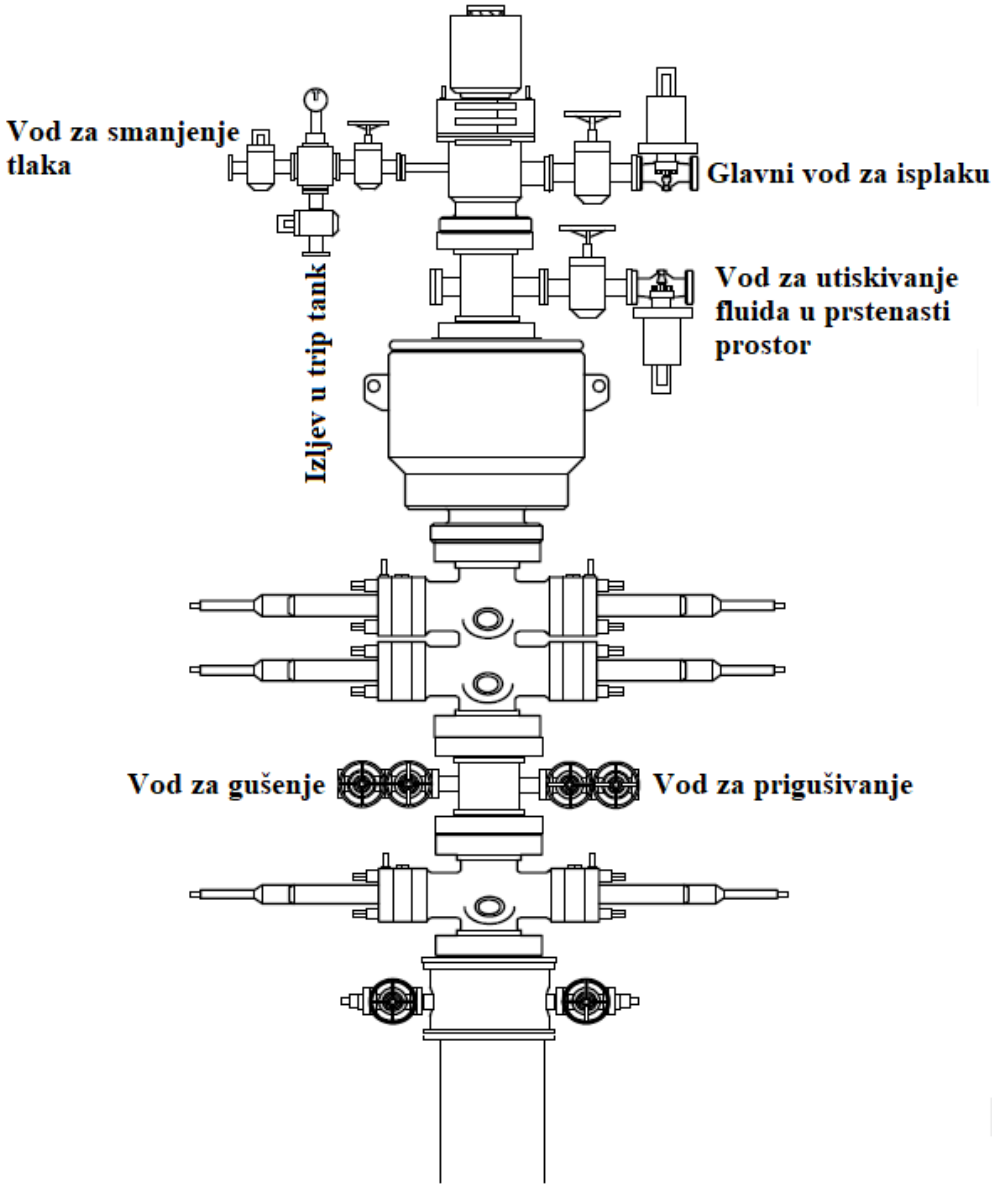
Iako su razne metode isprobane kako bi se precizno proračunalo potrebni volumen isplake koji se u ovim okolnostima utiskuje u prstenasti prostor, proračun je ograničen zbog nemogućnosti poznavanja svojstava fluida koji dotječe iz sloja. Brzina migracije fluida uzlazno kroz drugi fluid ovisi o razlikama gustoća i viskoznosti dvaju fluida, a proračun dodatno otežava i sklonost isplake reakciji s ležišnim fluidom.

Pri izvlačenju alatki iz bušotine, također se u prstenasti prostor utiskuje volumen isplake jednak volumenu čelika izvučenog alata. Ukoliko se utisne previše isplake, dolazi do njenih gubitaka, a ako se utisne premalo, dolazi do porasta tlaka u prstenastom prostoru, odnosno do dotoka.

Zbog male preciznosti klasičnih mjerila tlaka na bušotini, za bolju regulaciju kod primjene ove metode može se na vod za gušenje ili prigušivanje ugraditi igličasti ventil, dio opreme koji ima mogućnost detektiranja i najmanjeg tlaka u prstenastom prostoru.

7.2.2. Oprema za PMCD

Generalno, „Mud Cap“ bušenje zahtijeva minimalne prilagodbe opreme u odnosu na konvencionalno bušenje, tj. potrebna je samo instalacija rotirajuće bušaće glave (RCD) i dodatne protočne prirubnice za spajanje vodova za gušenje i prigušivanje ispod RCD-a. Posebnosti preventerskog sklopa prikazane su na slici 7-4. No kod pojave visokih tlakova, potrebne su neke veće preinake površinskog sustava. S obzirom da se potreba za ovom metodom javlja najčešće u HPHT bušotinama, često su baš ove preinake nužne te će stoga biti navedene (Colbert i Medley, 2002).



Slika 7-4. Preventerski sklop koji se koristi na bušaćem postrojenju kod primjene PMCD metode bušenja (Nas et al., 2009)

- Sustav za separaciju plina

Iako je bušotina zatvorena i metoda se zasniva na potiskivanju kiselih plinova natrag u formaciju, za slučaj otvaranja bušotine preporuča se instalacija gravitacijskog ili vakuumskog odvajača plina. Mogu se ugraditi i oba te instalirati u seriju kako bi zajedno dali efikasniji sustav za odvajanje plina. Separatori se pozicioniraju nakon razdjelnika sapnice, kako bi se plin iz sustava izdvojio čim ranije i preusmjerio na baklju.

- Cirkulacijski sustav

Sve komponente sustava moraju biti sposobne izdržati najveći tlak utiskivanja pri „Mud Cap“ bušenju. Kod bušenja „Mud Cup“ metodom u slučaju visokih slojnih tlakova (engl. *HPMCD – High Pressure Mud Cap Drilling)*, to često znači da oprema mora imati radni tlak od oko 700 bar (10 000 psi). Također, potrebno je ugraditi dodatne sigurnosne ventile između pumpe i zasuna stojke i priključka na bušotinskoj glavi na prstenasti prostor kanala bušotine.

- Sisaljke

Najmanje dvije sisaljke moraju biti tako spojene da se bilo kojom od njih može potiskivati voda ili isplaka, kroz niz alatki ili u prstenasti prostor. U slučaju HPMCD operacija, na mjesto sisaljke spaja se agregat za protiskivanje cementne kaše. Sigurnosni prekidači za gašenje visokotlačnih sisaljki moraju se strateški postaviti na više mjesta na postrojenju zbog sigurnosti.

- Stojka

Danas su česta postrojenja s dvije stojke. Svaka bi trebala biti spojena na gibljivo crijevo, iako se jednu smatra aktivnom, a drugu rezervnom. Za MCD se mogu koristiti istovremeno, jedna za utiskivanje u bušaći niz, a druga u prstenasti prostor. Potrebno je ugraditi zasun za ispuštanje tlaka iz stojke koji se može kontrolirati s bušačeve konzole, a ne nužno sa razdjelnika stojke.

- Gibljivo crijevo

Kao i kod stojki, danas su dostupna gibljiva crijeva s radnim tlakom do približno 700 bar (10 000 psi), što omogućava sigurno provođenje HPMCD operacija. Gibljiva crijeva potrebno je ispitivati tijekom ispitivanja preventerskog sklopa.

- Isplačna glava ili vršni pogon

Bila u sustavu isplačna glava ili vršni pogon, potrebno je da bude projektirana na isti radni tlak kao stojka. Za MCD operacije preporuča se korištenje vršnog pogona zbog načina pomicanja i rotacije bušaćih šipki.

- Dubinski sigurnosni ventil (engl. *Casing Deployment Valve*)

Na nizu zaštitnih cijevi ugrađuje se dubinski sigurnosni ventil koji se kontrolira pomoću posebnog voda spuštenog zajedno sa zaštitnim cijevima tijekom njihove ugradnje. Njegova je namjena održavanje dvostruke tlačne barijere tijekom podizanja i spuštanja dubinskog bušaćeg sklopa.

7.3. Metoda bušenja u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz konstantno utiskivanje fluida u bušaći niz (engl. *DMCD – Dynamic Mud Cap Drilling*)

Ova varijacija MCD-a sastoji se od konstantnog utiskivanja isplake kroz bušaći niz u prstenaste prostore između dva niza zaštitnih cijevi i niza bušaćih alatki (engl. *DMCD – Dynamic Mud Cap Drilling*) kako bi se u potpunosti izbjegla mogućnost pojave slojnog fluida na površini. Do potrebe za ovom metodom dolazi kad postoje prepreke za korištenje prethodno navedenih metoda, poput:

- nedostupnosti isplake adekvatnih svojstava za utiskivanje u prstenasti prostor;
- nemogućnosti sigurne primjene FMCD metode bušenja zbog postojanja sloja s vrlo niskim slojnim tlakom;
- postojanja potencijalno opasnih spojeva u slojnom fluidu, zbog čega je svaka njihova pojava na površini sigurnosni rizik;
- situacije gdje je često potrebno utiskivanje fluida u prstenasti prostor (engl. *bullheading*) u slučaju primjene PMCD metode bušenja, što ju čini neekonomičnom i sl.

Bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz konstantno utiskivanje fluida u bušaći niz zahtijeva neprekidnu cirkulaciju fluida kroz bušaći niz alatki i prstenaste prostore. Ponekad ova metoda pojednostavljuje situaciju, jer je moguće u oba cirkulacijska kruga cirkulirati isti, žrtveni fluid, poput morske vode kod bušenja u odobalju. Ova prednost ne vrijedi za bušenje na kopnu zbog mogućih logističkih komplikacija u slučaju potrebe dopreme vode cisternama.

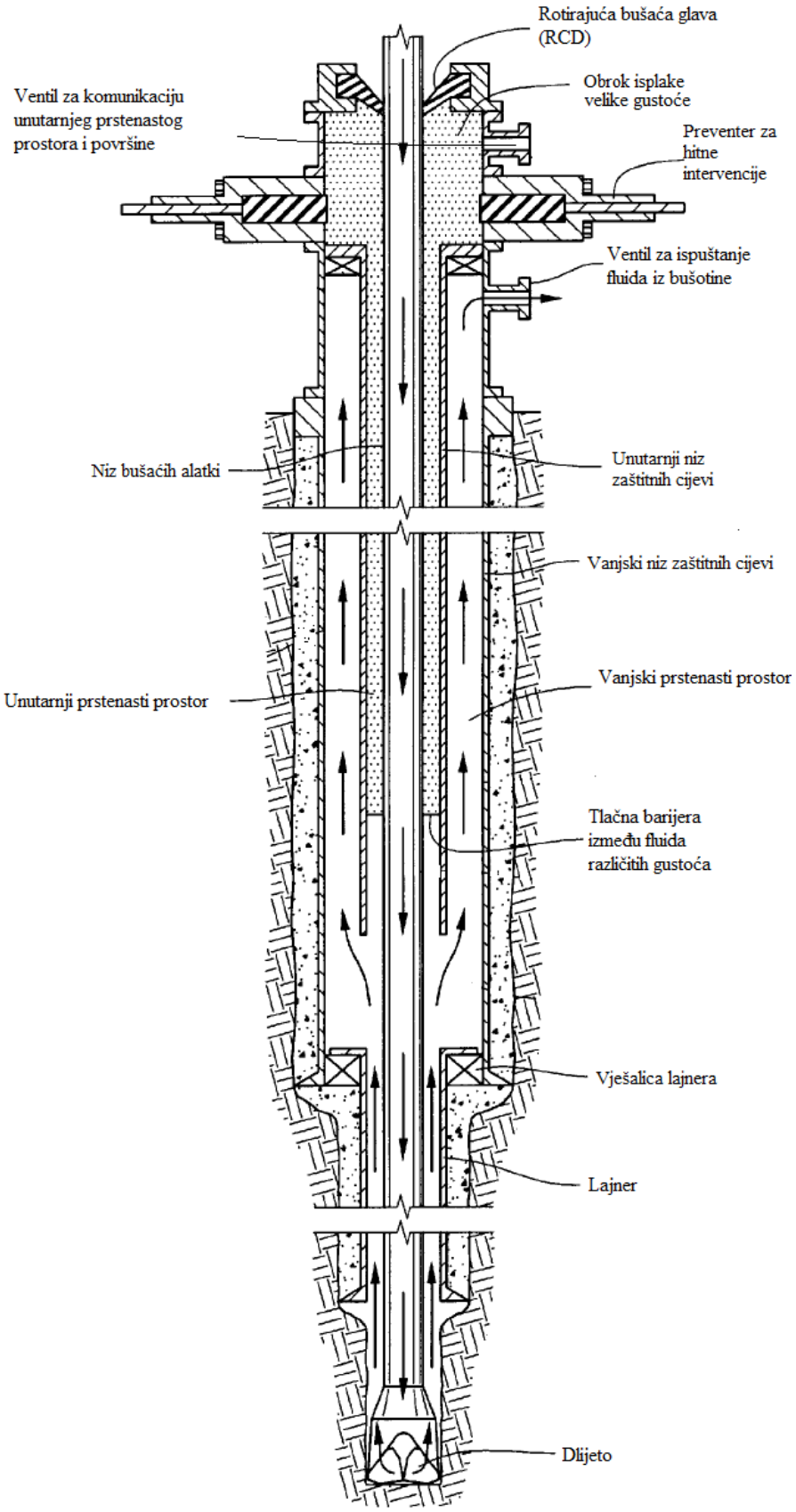
Posebnost ove metode krije se u tome što je prisutna cirkulacija kroz vanjski i unutarnji prstenasti prostor dvaju niza zaštitnih cijevi. Slika 7-5 prikazuje najjednostavniju od nekoliko varijanti ove metode bušenja objašnjenih u patentu Hosie et al., 2004. Prva razlika koja se na slici primjećuje, u odnosu na druge metode, jest postojanje vanjskog i

unutarnjeg niza zaštitnih cijevi te lajnera. Zbog prisutnosti dva niza zaštitnih cijevi uz niz bušaćeg alata, u kanalu postoje dva prstenasta prostora, vanjski i unutarnji.

Na vrhu cijelog sustava nalazi se brtveni element. U promatranom slučaju je to rotirajuća bušaća glava, no mogu biti korišteni i drugi uređaji za brtvljenje. RCD sadrži brtvu koja rotira s bušaćim nizom, a brtvljenje je poboljšano u ovom slučaju djelovanjem stupca isplake velike gustoće koji odozdo pritišće donju površinu RCD-a, čime se pomaže ostvariti njegova uloga barijere između unutarnjeg prstenastog prostora i podišta tornja. Ispod RCD-a u sustavu se nalazi ventil za ostvarivanje komunikacije između unutarnjeg prstenastog prostora i površine te ispod njega preventer za hitne intervencije.

Isplaka se utiskuje konstantno u niz bušaćih alatki te se izlaskom kroz mlaznice dlijeta počinje miješati sa već prisutnim fluidom. Tlak u bušotini djeluje suprotno hidrostatskom tlaku stupca otežane isplake u unutarnjem prstenastom prostoru, zbog čega se stvara barijera označena na slici. Funkcija takve barijere je zadržavanje otežane isplake u unutarnjem prstenastom prostoru, i onemogućavanje migracije ugljikovodika kroz unutarnji prstenasti prostor. Ugljikovodici se tako usmjeravaju u vanjski prstenasti prostor i iscirkuliravaju iz bušotine kroz otvor ispod spomenutog preventera za hitne intervencije.

Ukoliko se u ovaj sustav ugradi dubinski sigurnosni ventil u nizu zaštitnih cijevi, omogućuje se vađenje niza bušaćih alatki bez ikakvog utjecaja ove operacije na tlak u bušotini. Niz se zadiže toliko da se dlijeto nalazi iznad ventila nakon čega se ventil zatvara i sprječava ulaz povratnog toka isplake u unutarnji prstenasti prostor. Kad se niz spušta natrag u bušotinu, ventil se otvara kad je dlijeto tik iznad njega, kako bi se niz mogao spustiti do dna bušotine.



Slika 7-5. Varijanta DMCD s dva niza zaštitnih cijevi i lajnerom (Hosie et al., 2004)

7.4. Bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz povećanu kontrolu parametara (engl. *CMC - Controlled Mud Cap*)

Bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz povećanu kontrolu parametara je varijacija sustava za bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu dodatnog tlaka na statički fluid u prstenastom prostoru, s razlikom da se za održavanje razine isplake u prstenastom prostoru umjesto sapnice koristi sisaljka. Također, rajzerski niz je iznad razine isplake ispunjen zrakom ili plinom, dok se u klasičnoj PMCD metodi rajzer uvijek u potpunosti ispunjava isplakom, a usto ovaj sustav dozvoljava otvoreni i zatvoreni sustav cirkulacije isplake, odnosno dozvoljava i otvorenu bušotinu, a ne nužno zatvoreni sustav za zadržavanje tlaka u bušotini RCD-om kako je to nužno za druge MCD metode. Glavna ideja razvijanja ovog sustava je poboljšana kontrola tlaka u bušotini pomoću održavanja ECD-a na željenoj vrijednosti, što se postiže podešavanjem visine stupca isplake u rajzeru pomoću podvodne isplačne sisaljke spojene na kanal bušotine, odnosno LRRS-om (engl. *Low Riser Return System*).

Slika 7-6 predstavlja skicu sustava na temelju koje su Fossil i Sangeslang (2004.) obrazložili djelovanje ove metode. Ispod površine mora se ugrađuje podvodna isplačna sisaljka i povezuje na spojnicu za ispuštanje fluida iz rajzera. Spomenuta spojnica sadrži visokotlačne ventile koji omogućavaju izolaciju LRRS sustava od niza usponskih cijevi odnosno njegovu zaštitu, kao i senzore tlaka na različitim udaljenostima kako bi se mogla precizno odrediti razina isplake u nizu usponskih cijevi. Sisaljka je s isplačnim bazenima na površini povezana vodovima za punjenje i povrat isplake, što joj omogućuje podizanje i spuštanje razine isplake u nizu usponskih cijevi ovisno o potrebi. Duljinom rajzera postavljaju se osjetnici tlaka kako bi se moglo precizno odrediti razinu isplake u cijevi.

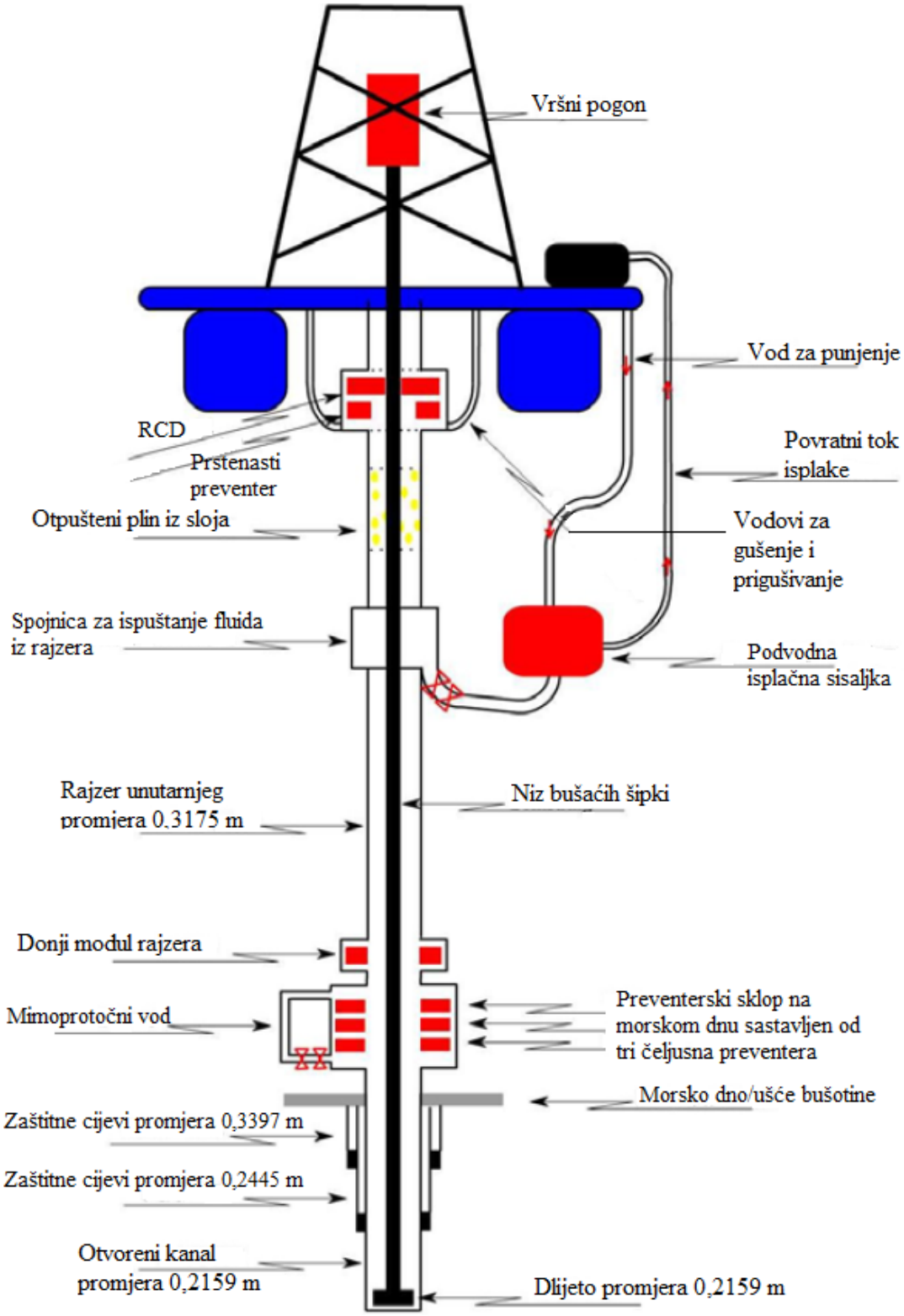
Fleksibilnost primjene ovog sustava za otvorenu ili zatvorenu cirkulaciju isplake možda je najvažnija karakteristika ovog sustava. Osnovna prednost otvorenog sustava jest ta što nema potrebe za opremom za trajno zatvaranje bušotine kako bi se „zarobio“ tlak, što je vrlo važna odlika kada značajniji pomaci postrojenja utječu na kontrolu tlaka u zatvorenom sustavu. Takva se situacija može dogoditi po umetanju klinova za dodavanje bušaće šipke. Druga prednost otvorenog sustava je mogućnost projektiranja sustava u kojem tlak na dnu niza usponskih cijevi može biti jednak ili čak manji od hidrostatskog tlaka morske vode (engl. *positive riser margin*). Ova je prednost naročito vidljiva u slučaju otpajanja rajzerskog niza, jer se tlak na dno bušotine tada povećava, poboljšavajući pritom kontrolu tlaka u bušotini. Sustav se ponaša kao otvoreni sve do zatvaranja jednog od

preventera iznad razine mora. S obzirom da je u otvorenom sustavu u gornjem dijelu rajzera zrak na atmosferskom tlaku, rajzerski niz se ponaša kao svojevrsni separator ugljikovodika gdje se odvaja plin, a kapljevina se pomoću podvodne sisaljke transportira na platformu.

Dizajn sustava omogućuje prilagodbu razine isplake u rajzeru u slučaju problema kontrole tlaka u bušotini. Podvodni preventerski sklop tada se automatski zatvara, a razina isplake u rajzeru podiže kako bi se kompenzirala promjena tlaka uslijed gašenja sisaljki i na taj način spriječio dotok. RCD se zatvara, ali s otvorenim vodom za prigušivanje, kako ne bi došlo do povećanja tlaka stupca plina u rajzerskom nizu. Cijela se procedura može odviti u vrlo kratkom vremenskom roku.

Glavni izazov kod primjene ove metode je djelovanje hidrostatskog stupca isplake u bušaćem nizu na dno bušotine dok je zatvoren podvodni preventerski sklop. Zbog korištenja veće gustoće isplake negoli pri konvencionalnom bušenju, može doći do frakturiranja stijene. Odnosno, zbog efekta „U“ cijevi razlika tlakova u bušaćem nizu i prstenastom prostoru uzrokuje istjecanje isplake u prstenasti prostor, do izjednačavanja tlakova unutar i izvan bušaćeg niza. Taj se problem riješio ugradnjom diferencijalnog tlačnog ventila, koji se zatvara kada vrijednost tlaka u prstenastom prostoru postane manja od tlaka unutar bušaćih šipki.

Koristeći sustav za kontrolirani „Mud Cap“, promjene vrijednosti tlaka u bušotini ponašaju se vrlo slično kao kod konvencionalnog bušenja, iako je korištena isplaka veće gustoće, a gornji dio niza usponskih cijevi ispunjen zrakom. Bušač je u mogućnosti kontrolirati tlak u kanalu bušotine vrlo precizno podešavanjem razine isplake u nizu usponskih cijevi, a olakšana je kontrola i iscirkuliravanje dotoka.



Slika 7-6. Shema opreme za kontrolirani „Mud Cap“ (Fossil i Sangeslang, 2004)

7.5. Kriteriji za odabir pojedine „Mud Cap“ metode bušenja

Kao i kod drugih metoda bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka, potreban je dobar razlog za prelazak na nekonvencionalnu metodu bušenja kakvu predstavlja MCD. Spomenuto je da se „Mud Cap“ metoda primjenjuje pri bušenju frakturiranih slojeva, odnosno zona s velikim ili potpunim gubicima isplake. Upravo se u tome krije primarni uvjet za primjenu MCD-a, a to je bušenje propusnog sloja s niskim tlakom utiskivanja „žrtvenog“ fluida. Drugim riječima, dolazi do pojave problema koji se mogu otkloniti razmatranom metodom. Nakon što je taj prvi uvjet zadovoljen, razmatraju se faktori sigurnosti, ekonomičnosti i logistike.

7.5.1. Sigurnost

Kao i uvijek, primarna je sigurnost, odnosno ukoliko je ugrožena sigurnost osoblja zadržavanjem konvencionalnog načina rada, moraju se učiniti nekakve promjene u sustavu. S obzirom da je prvi uvjet za MCD vezan za gubitak isplake, što dovodi do otežane kontrole tlaka u bušotini, ovaj kriterij najčešće će presuditi u korist primjene „Mud Cap“ metoda bušenja.

7.5.2. Ekonomičnost

Pitanje ekonomičnosti MCD-a u odnosu na konvencionalno bušenje može se podijeliti u tri zasebna problema: brzina gubljenja isplake, vrijeme bušenja i dubina na kojoj se buši.

Prvo je pitanje volumena izgubljene isplake u jedinici vremena, gdje se uspoređuju financijski gubici uslijed otjecanja isplake u sloj i potrebnih ulaganja za instaliranje opreme i dopremanje „žrtvenog“ fluida za MCD, kao i proračun svojstava isplake za „Mud Cap“ bušenje i njenog potrebnog volumena kako bi se procijenio cjelokupni trošak MCD metode. Ovakvim proračunom dolazi se do granične vrijednosti ekonomičnosti ove metode (npr. već kod intenziteta gubljenja isplake većeg od 7 m^3/h, ekonomično je prijeći na MCD).

Iako je proračunom moguće dobiti točnu vrijednost cijene kanala bušotine po izbušenom metru, računa se da je MCD isplativ kada vrijeme provedeno u bušenju postane manje od 8 do 12 sati na dan. Konvencionalnim bušenjem smanjivat će se vrijeme provedeno u bušenju sa svakom sljedećom frakturom ili zonom gubitaka isplake na koju se naiđe, te će se istovremeno povećavati potrebno vrijeme za pokušaje kontrole gubljenja isplake primjenom materijala za čepljenje zona gubljenja isplake, protiskivanjem viskoznih čepova isplake i primjenom konvencionalnih metoda kontrole tlaka.

Treći faktor, vezan za dubinu formacija koje se buše, nešto je kompliciraniji za analizu. Naime, na mjestima gdje postoji potreba za MCD-om, često se uopće ne može nastaviti s konvencionalnim bušenjem te se staje s izradom kanala bušotine, moguće ne dosegnuvši ciljanu formaciju. Ukoliko je MCD metoda jedini način za izradu kanala kroz željenu formaciju, tada veća cijena izbušenog metra nije ograničavajući faktor. No, najčešće je razmatranje ovog parametra suvišno, jer gubici vremena i isplake već ranije odlučuju o ekonomičnosti prelaska na „Mud Cap“ metode bušenja.

7.5.3. Logistika

Logističke poteškoće odnose se na ograničeni volumen isplačnih bazena, te prostor za skladištenje i mogućnost dopremanja potrebnih materijala za izradu isplake. Uobičajeno je na lokaciji bušenja imati sustav bazena za skladištenje isplake s kapacitetom od 320 do 475 m^3 (2 000 - 3 000 bbl), te mogućnost miješanja 16 do 32 m^3 (100 - 200 bbl) nove isplake na sat. To je uglavnom dovoljno i za MCD, uzevši u obzir činjenicu da su gubici isplake pri konvencionalnom bušenju daleko veći od onih pri MCD-u. Stoga je mnogo važnije razmotriti podatak o potrebnom volumenu „žrtvenog“ fluida, a podaci ukazuju na to da „Mud Cap“ metode bušenja nije moguće primijeniti ukoliko sustav za cirkulaciju, ali i za dobavu svježe vode ima kapacitet manji od 1431 do 1908 m^3 (9 000 do 12 000 bbl) na dan (Medley et al., 2004).

7.6. Ograničenja primjene „Mud Cap“ metoda

Iako ne zahtijevaju velike promijene na postrojenjima u smislu instalacije dodatne opreme, uz potrebnu obuku radnika i nesigurnosti koje proizlaze iz kompliciranih procedura, dva su glavna ograničenja za korištenje „Mud Cap“ metoda (Goodwin et al., 2014):

- mora postojati sloj koji je sposoban dulje vrijeme primati velike količine „žrtvenog“ fluida i krhotine nabušenih stijena, i
- potreba za velikim količinama „žrtvenog fluida“ i isplake koja će biti smještena u prstenastom prostoru kanala bušotine.

Često pogreške u komunikaciji i oklijevanje primjene manje poznate metode dovode do prekasne primjene ili uopće neprimjenjivanja ove metode u slučajevima kad bi ona bila najbolje rješenje. Zbog toga Medley et al. (2004) predlažu pojednostavljenje pri razmatranju koje se sastoji od četiri pitanja:

- Postoje li gubici isplake koji volumenom odgovaraju pojavi frakture ili višestrukih fraktura u zabušenom sloju?
- Je li se povećao rizik za osoblje na postrojenju otkad se bušotina počela ponašati na taj način?
- Je li ekonomično prijeći na MCD?
- Jesu li logistički preduvjeti zadovoljeni za upotrebu MCD-a?

Ako je odgovor na bilo koja dva od navedena četiri pitanja „da“, opravdan je prelazak na „Mud Cap“ metodu bušenja.

8. PRIMJENA „MUD CAP“ BUŠENJA U PRAKSI

Za analizu primjena „Mud Cap“ metoda bušenja u praksi odabrana su dva slučaja gdje su se sve druge metode bušenja pokazale neuspješnima. U prvom se slučaju radi o *re-entry* operaciji, gdje se iz već postojeće, stare bušotine izrađuje novi dio kanala do sloja i ležišta ispod iscrpljenog ležišta. Iscrpljena ležišta uvijek se ističu kao zone visoke vjerojatnosti gubitka isplake, dok se MCD često primjenjuje i pri bušenju istražnih bušotina na nepoznatom terenu – kako je vidljivo u drugom primjeru.

8.1. Primjena PMCD kod izrade re-entry bušotine u Saudijskoj Arabiji

Tijekom bušenja re-entry bušotine, korištena je metoda bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka na dno bušotine. Ona se pokazala neadekvatnom zbog nekontroliranih gubitaka isplake u sloj, što u potpunosti onemogućuje njenu primjenu. Ispočetka je stav stručnjaka bio kako je moguće izbjeći takve gubitke održavanjem tlaka na dno bušotine u odgovarajućem intervalu, no, podcijenili su postojeće frakture vrlo velikih propusnosti. Bušenje u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu dodatnog tlaka na statički fluid u prstenastom prostoru (PMCD) primijenjeno je s dva cilja: smanjiti učestalost diferencijalnog prihvata alatki i problema kontrole tlaka u bušotini te svesti na najmanju moguću vrijednost potrebnu količinu isplake za re-entry operaciju.

Prije prelaska na bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka učinjena je analiza rizika gdje su istaknuti problemi koji se očekuju tijekom bušenja:

- Diferencijalni prihvat u zonama niskog tlaka i velike propusnosti

Postoji mogućnost da prijelazom na PMCD, upotrebom viskoznog fluida bez suspendiranih čestica dođe do oštećenja isplačnog obloga iznad sloja gdje se gubi isplaka. Kako bi se smanjila vjerojatnost oštećenja isplačnog obloga, umjesto kalcijeva karbonata ($CaCO_3$), kao aditiv za premoštenje u isplaci koja se koristi za bušenje do zone gubljenja koriste se grafit i gilsonit.

- Nekontrolirani protok na površini odnosno kvar RCD-a

Vjerojatnost za kvar rotirajuće bušaće glave (RCD-a) smatrala se vrlo niskom jer još takav slučaj nije bio zabilježen u regiji, niti se s tim problemima susrela kompanija koja je

angažirana za obavljanje radova. Za svaki slučaj se postavlja ograničenje radnog tlaka na površini od 34,5 bar (500 psi).

- Kvar protupovratnih ventila u nizu bušaćih alatki

Slučajevi kvarova protupovratnih ventila ranije su zabilježeni u regiji te je stoga vjerojatnost ponavljanja problema procijenjena kao visoka. Kako bi se rizik smanjio, odluka je da se koriste ventili kompanije zadužene za provođenje MPD-a umjesto protupovratnih ventila koji su se ranije koristili na postrojenju, i to najmanje dva ventila ugrađena u niz alatki. Ako dođe do problema, bušotina se guši i nastavlja izrađivati metodom bušenja u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu statičkog fluida u prstenastom prostoru (FMCD).

- Propuštanje niza bušaćih alatki

Propuštanje niza bušaćih alatki dovodi do neželjene komunikacije između unutrašnjosti bušaćeg niza i prstenastog prostora čime se narušava ostvareni tlak u prstenastom prostoru. Vjerojatnost za ovakvu pojavu smatra se srednjom ili niskom te se dodatno smanjuje propisivanjem kompletnog pregleda bušaćeg niza prije spuštanja u bušotinu.

- Migracija ugljikovodika ili sumporovodika do površine

Upravo ova varijanta „Mud Cap“ metode, koristi se kako bi se smanjila opasnost od migracije fluida i plinova iz sloja na površinu, jer omogućuje praćenje tlaka u prstenastom prostoru, što se uzima kao indikator kretanja dotoka u kanalu bušotine. Glavna barijera prolasku ugljikovodika i kiselih plinova je viskozna voda (vrijednosti naprezanja pri pokretanju 13,8-15,3 Pa) u ulozi „Mud Cap“ fluida.

- Čepljenje sloja

U slučaju čepljenja zone gubljenja isplake i ponovne uspostave regularne cirkulacije, može doći do čepljenja dijela kanala bušotine zbog prevelike količine krhotina na malom dijelu kanala, što otežava čišćenje istog. Vjerojatnost je vrlo mala te se rizik smanjuje ugradnjom alarma, rezervom od dva volumena kanala isplake za gušenje i mogućnost brzog prelaska na konvencionalni MPD (bušenje uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine).

- Spuštanje i podizanje niza bušaćih alatki

Za razliku od konvencionalnog MPD-a, gdje se podizanje i spuštanje alatki odvija u ugušenoj bušotini, u ovom slučaju bušotina ostaje pod tlakom pomoću RCD-a i „Mud Cap“ fluida u prstenastom prostoru sve do dubine na kojoj je sila uzgona i vrijednost tlaka veća od težine niza bušaćih alatki te postoji opasnost od izbacivanja niza bušaćih alatki iz bušotine. Tijekom spuštanja i podizanja alatki koristi se konvencionalni „Mud Cap“, i utiskivanje isplake veće gustoće u prstenasti prostor bušotine (engl. *bullheading*) u empirijski određenim količinama.

Pojednostavljenu proceduru izvedenog MPD bušenja moguće je podijeliti u tri točke:

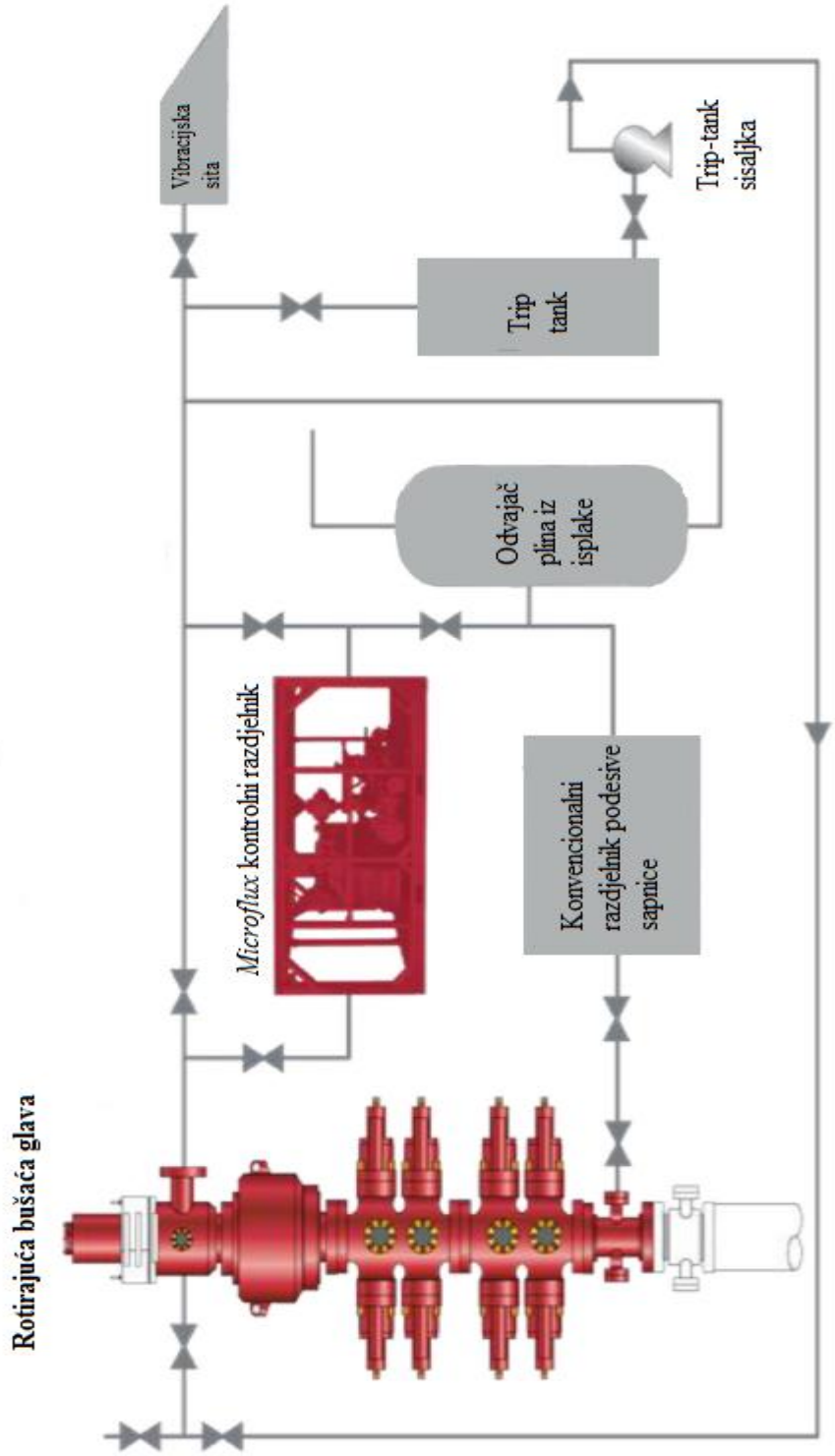
1. Tijekom bušenja konvencionalnim MPD-om u jednom trenutku došlo je do potpunog gubitka isplake. Tada se potpuno zatvorilo MPD sapnicu i započelo s punjenjem prstenastog prostora „Mud Cap“ isplakom uz praćenje tlaka u prstenastom prostoru. S punjenjem se stalo kad je tlak u prstenastom prostoru narastao na vrijednost 7-10 bar (100-150 psi). Bušenje se nastavilo u tako zatvorenoj bušotini uz utiskivanje žrtvene isplake kroz niz bušaćih alatki, a nakon svake zabušene šipke utisnula se porcija od 4,8 m^3 (30 bbl) viskozne vode za bolje čišćenje dna kanala bušotine od nabušenih čestica.
    a. Prstenasti prostor se punio vodom s dodatkom aditiva za povećanje viskoznosti (XC polimera) u koncentraciji 0,0015 ppm (1,5 ppb) čime se postigla viskoznost od oko 13,8 – 15,3 Pa (25-30 lb/100ft^2).
    b. MPD inženjer bilježio je volumen isplake potreban da se popuni prstenasti prostor.
2. Bušenje se nastavilo uz promatranje vrijednosti tlaka u prstenastom prostoru, jer se očekivala stabilizacija tog tlaka. U slučaju pada vrijednosti tlaka u prstenastom prostoru ispod 3,5 bar (50 psi), utiskivala bi se viskozna voda dobavom od 0,0027 m^3/s (1 bpm), a da je došlo do konstantnog rasta te vrijednosti bez naznaka zaustavljanja tog porasta uz konstantnu vrijednost tlaka u bušaćim šipkama, vršio bi se postupak utiskivanja fluida u prstenasti prostor korištenjem viskozne vode, dobavom od 0,0217 m^3/s (8 bbl/min) do dosezanja sloja „A“, vodonosnog sloja pod visokim tlakom koji se nalazi između prirodno frakturiranih intervala, što dovodi do povećane mogućnosti pojave diferencijalnog prihvata niza bušaćih alatki. Potrebno

je pritom bilo pratiti vrijednost tlaka u prstenastom prostoru, pri čemu su bile moguće tri opcije:

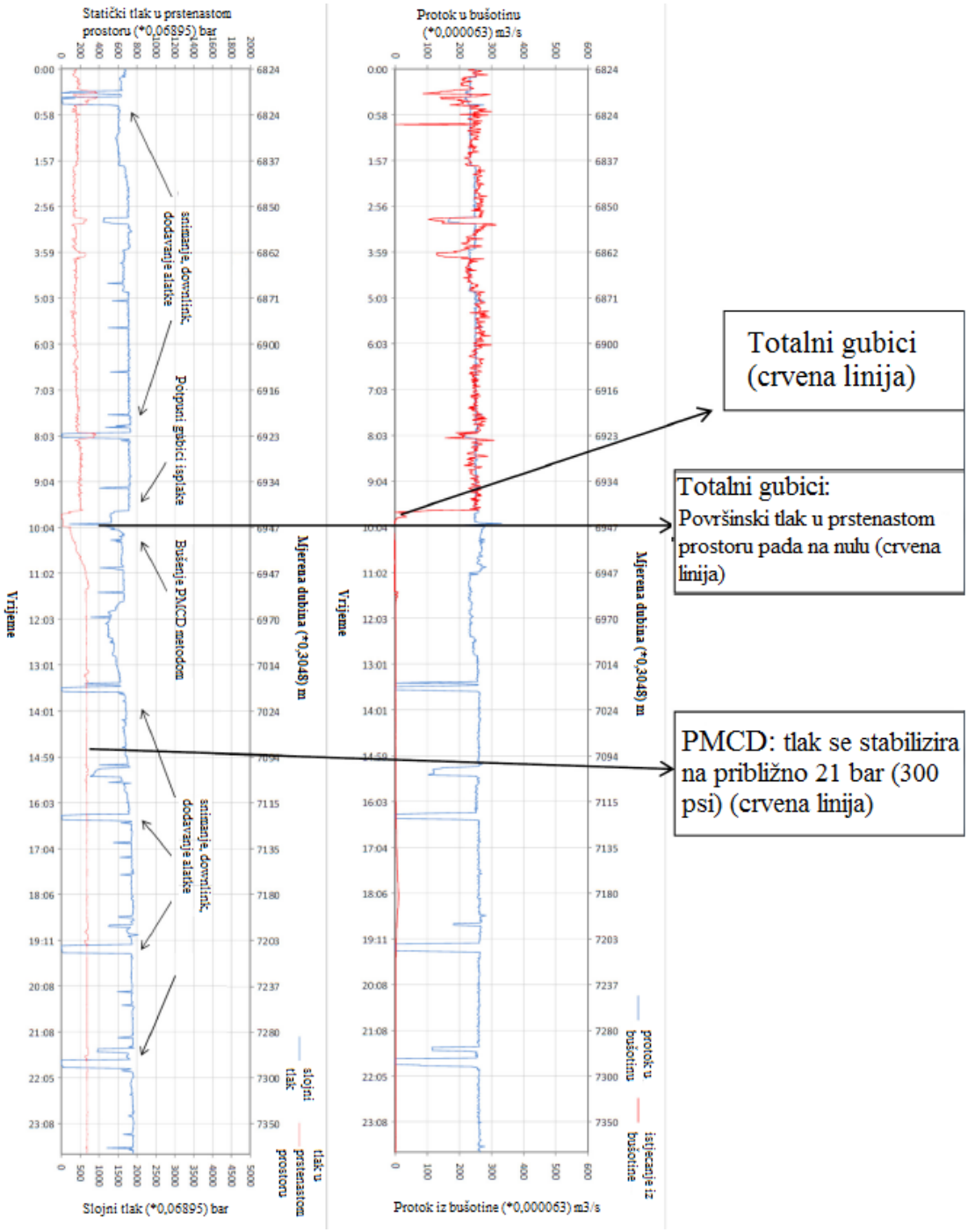
a. vrijednost tlaka je manja od 35 bar (500) psi, bušenje se nastavlja uz njegovo konstantno praćenje;
b. vrijednost tlaka veća je od 35 bar (500 psi), proračun se ponavlja i određuje nova potrebna gustoća „Mud Cap“ isplake te se novom isplakom vrši utiskivanje fluida u prstenasti prostor i nastavlja bušenje;
c. s porastom tlaka u prstenastom prostoru raste i vrijednost tlaka u bušaćim šipkama što najvjerojatnije ukazuje da je došlo do čepljenja zone gubljenja isplake te se pokušava uspostaviti konvencionalnu cirkulaciju isplake i nastavlja s bušenjem.

3. Ako su gubici potpuni i nije moguća nijedna od prethodne dvije metode (metoda bušenja uz održavanje stalne vrijednosti tlaka na dno bušotine i bušenja u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu dodatnog tlaka na statički fluid u prstenastom prostoru), pozitivan tlak u prstenastom prostoru ostvaruje se utiskivanjem 0,0083 m^3/s (3 bbl/min) viskozne vode, a ako to nije moguće utiskuje se obična voda i svakih sat vremena obrok od 4,8 m^3 (30 bbl) viskozne vode.

Nakon objašnjenog postupka planiranja, započelo je bušenje uz primjenu opreme prikazane na slici 8-1 Tijekom bušenja kroz sloj „A“ izmjeren je visoki slojni tlak formacije te je maksimalna vrijednost zabilježena za potrebe kasnijeg proračuna gustoća isplake za gušenje i „Mud Cap“ fluida. Bušenje se nastavilo do željenog, proizvodnog sloja „B“ uz korištenje konvencionalne metode bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka te je nakon otprilike 120 m (400 ft) horizontalnog bušenja kroz sloj „B“ došlo do totalnih gubitaka isplake. Ukupno je gotovo 760 m horizontalnog kanala bušotine izbušeno nakon pojave totalnih gubitaka korištenjem PMCD metode opisane ranije. Na slici 8-2 može se vidjeti kako je tlak u prstenastom prostoru na ušću od početka upotrebe PMCD metode održavan na 20 bar (300 psi) bez većih odstupanja. Nakon bušenja, princip korištenja metode bušenja u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu dodatnog tlaka na statički fluid u prstenastom prostoru primijenjen je i tijekom proširivanja kanala, mjerenja u bušotini te postavljanja lajnera. Cementacija lajnera obavljena je pomoću MPD opreme nakon čega više nije bilo potrebe za istom.



Slika 8-1. Shema korištene opreme za PMCD na bušotini u Saudijskoj Arabiji (Al-Amri et al., 2016)



Slika 8-2. Dio grafa prikazuje zabilježene vrijednosti tlakova i protoka isplake tijekom opisanog re-entry bušenja u Saudijskoj Arabiji (Al-Amry et al., 2016)

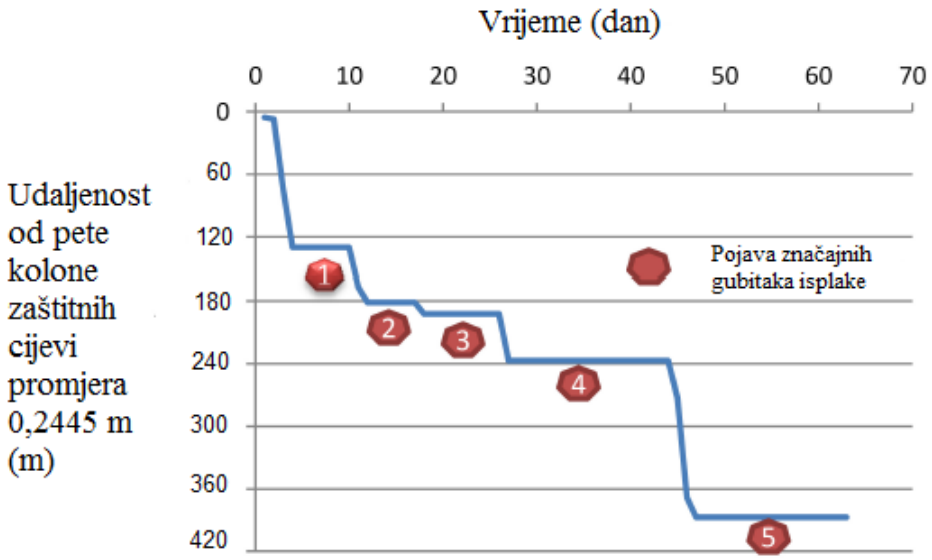
Procjenjuje se da je primjena metode bušenja u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu dodatnog tlaka na statički fluid u prstenastom prostoru dovela do uštede od oko 2700 m^3 (17 000 bbl) isplake, što je značajan utjecaj, naročito uračunavši činjenicu da materijal za tu količinu isplake treba dovesti u gotovo 200 kamiona, što iziskuje 76 000 km

teškog teretnog prometa. Po pitanju mehaničke brzine bušenja nije zabilježena veća razlika u problematičnom dijelu kanala, dok je u dijelu prije pojave problema zabilježeno povećanje brzine bušenja od 33% korištenjem MPD metode umjesto konvencionalnog bušenja (Al-Amry et al., 2016).

8.2.Primjena PMCD pri bušenju HPHT bušotine u Abu Dhabiju

Tijekom odobalnog bušenja istražne HPHT bušotine u Abu Dhabiju, došlo je do problema s kontrolom tlaka u bušotini uslijed gubitaka isplake u čak pet navrata prije nego se pribjeglo MPD metodama bušenja. Izgubljeno je više od dva mjeseca vremena na provođenje postupaka kontrole tlaka, što je vidljivo i na slici 8-3. Problem je uvijek nastajao u sloju „K“ koji čine vapnenac i dolomit, a kroz koji je trebalo proći do sloja „P“ kako bi se ocijenio njegov potencijal za pridobivanje ugljikovodika.

U radu iz 2014., Al-Awadhi et al. opisuju svaki pojedini slučaj gubitka kontrole nad spmenutom bušotinom, no svi se svode na isto – u jako frakturiranom dijelu plinom zasićenog sloja „K“ došlo je do nekontroliranih gubitaka isplake i dotoka plina u bušotinu. Iako su za sprječavanje gubitaka korištene razne varijante i mješavine materijala za čepljenje zona gubitaka isplake (CaCO3, cementni čepovi), nijedna se kombinacija nije pokazala učinkovitom te je u jednom trenutku došlo do akumulacije veće količine plina u bušotini. Nadalje, zbog višestrukih utiskivanja obroka materijala za čepljenje zona gubljenja isplake i cementnih čepova, javili su se i problemi s obljepljivanjem niza bušaćih alatki što je dovelo do potrebe za skretanjem kanala bušotine (engl. *sidetrack*). Shvativši da konvencionalna metoda bušenja nije dorasla uvjetima u ležištu, tim stručnjaka odabrao je „Mud Cap“ metodu bušenja kao odgovarajuće rješenje za opisane probleme.



Slika 8-3. Vrijeme utrošeno na konvencionalno bušenje prije prelaska na „Mud Cap“ metodu bušenja (Al-Awadhi et al., 2014)

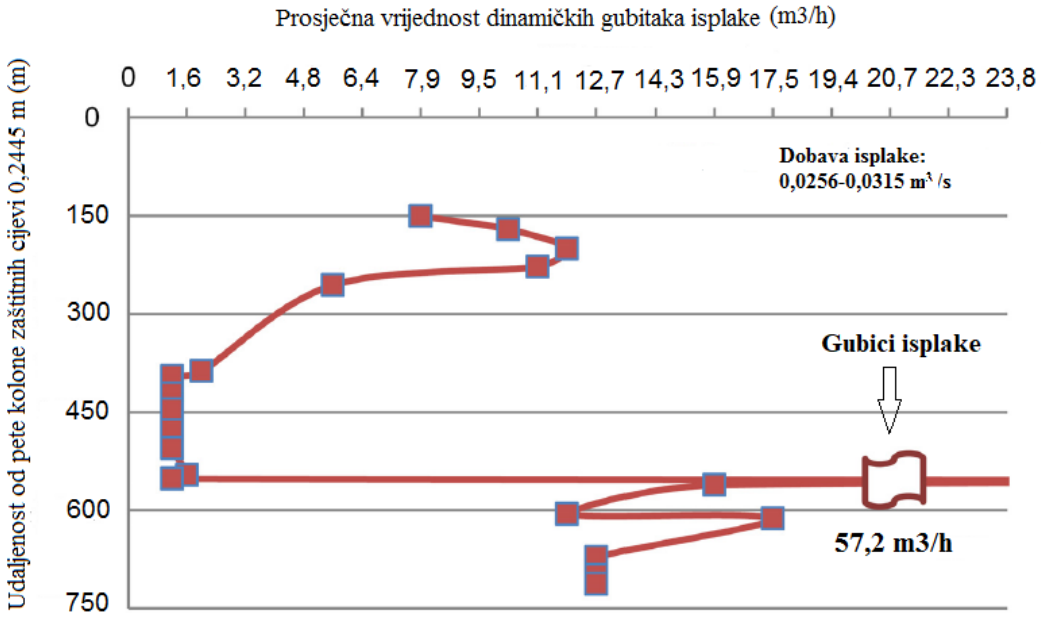
Nakon postavljanja opreme za bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka, započeto je bušenje obilaznog kanala konvencionalnom metodom. Po ulasku u sloj „K“, došlo je do gubitaka isplake od 6,4 do 9,5 m^3/h (40-60 bbl/h), ali se bušenje nastavilo normalno, uz dobar povrat isplake na površinu. Otprilike 203 m (667 ft) ispod pete zadnje ugrađene kolone zaštitnih cijevi promjera 0,2445 m (9 ⅝") gubici su se povećali na 9,5 do 14,3 m^3/h (60-90 bbl/h) i sustav je prilagođen za nastavak metodom bušenja u uvjetima potpunog gubljenja isplake uz primjenu statičkog fluida u prstenastom prostoru (FMCD). Promjena načina bušenja popraćena je i promjenama u sastavu isplake, u koju se dodaju obroci materijala za čepljenje zona gubljenja isplake (sitne i vrlo sitne čestice $CaCO_3$) te se svakih 27 m (90 ft) utiskuje obrok isplake s materijalima za čepljenje zona gubljenja isplake (sitne i srednje čestice $CaCO_3$) što dovodi do smanjenja gubitaka na 0,8 do 1,6 m^3/h (5-10 bbl/h). Bušenje se nastavlja uz održavanje mehaničke brzine bušenja na 6 m/h (20 ft/h) uz praćenje temperature i ECD pomoću APWD sustava za mjerenje tlaka u prstenastom prostoru kanala bušotine (engl. *annular pressure while drilling*). Međutim, na dubini od 565 m (1852 ft) ispod pete kolone cijevi promjera 0,2445 m (9 ⅝"), dolazi do naglog povećanja gubitaka isplake do čak 57,2 m^3/h (360 bbl/h). (Slika 8-4) Problem je trebao biti riješen korištenjem morske vode kao žrtvene isplake, no nije se tome pribjeglo, već se ustrajalo na FMCD metodi kojom su gubici smanjeni na 12,7 m^3/h (80 bbl/h), za što je bio dovoljan dostupan

volumen isplake gustoće 1410 kg/m^3 u kombinaciji s brzinom miješanja nove isplake potrebne gustoće. Bušenje je nastavljeno do željene dubine bez novih problema vezanih uz gubitke isplake i kontrolu tlaka.

Po završetku bušenja, statički gubici na dnu kanala iznosili su 6,4 m^3/h (40 bbl/h), dok su dinamički gubitci uz dobavu isplake od 0,0283 m^3/s (450 gpm) iznosili od 9,5 do 11,1 m^3/h (60-70 bbl/h). Iako je rotirajući upravljivi sustav (engl. RSS - *rotary steerable system*) nakon bušenja bio zadignut do zacijevljenog dijela kanala, zbog opažanja velike koncentracije LCM materijala istaloženih na dnu bušotine, vraćen je na dno kako bi se utisnulo novu količinu materijala za spriječavanje gubljenja isplake ($CaCO_3$, orahove ljuske i vlaknasti materijali) LCM čime su statički gubici smanjeni na 1,6 do 2,4 m^3/h (10-15 bbl/h). U svrhu daljnje stabilizacije kanala spušten je niz bušaćih alatki bez stabilizatora (engl. *slick assembly*) promjera 0,2127 m (8 ⅜") s nerotirajućom alatkom za čišćenje stijenki bušotine promjera 0,2445 m (9 ⅝") i utisnuto je dodatnih 23,8 m^3 (150 bbl) LCM materijala. To se pokazalo pogrešnim jer je zabilježen porast cirkulacijskog tlaka i nategа niza bušaćih alatki zbog čega su utisnuti materijali za čepljenje zona gubitaka isplake iscirkulirani iz kanala bušotine. Bušaće alatke su oslobođene desnim zakretanjem uz smanjenje opterećenja na niz. Tada je ponovno spušten niz bušaćih alatki bez stabilizatora i utisnuti su novi materijali LCM za stabilizaciju kanala. Konačne vrijednosti gubitaka bile su 0,64 m^3/h (4 bbl/h) u statičkim uvjetima i 1,6-1,9 m^3/h (10-12 bbl/h) u dinamičkim uvjetima. Nakon ovakve stabilizacije omogućena je ugradnja lajnera vanjskog promjera od 0,1778 m (7") u novoizrađeni interval bušotine koja je protekla bez problema s cementacijom kakve često uzrokuju zone gubljenja isplake.

„Mud Cap“ metoda bušenja u ovom se primjeru pokazala sigurnom i ekonomičnom u usporedbi s konvencionalnim bušenjem koje je bilo čak 3,35 puta skuplje po jedinici duljine izbušenog kanala. Kao LCM materijal uglavnom je korišten $CaCO_3$ zbog najmanjeg štetnog utjecaja za ležišnu stijenu. U frakture sloja „K“ potisnute su čestice $CaCO_3$ zajedno s razrušenim česticama vapnenca i dolomita, a sve napomenute čestice mogu se tretirati kiselinom kako bi se naknadno uklonile. Ugradnja lajnera protekla je bez problema, no smatraju se moguće opasnima varijacije tlaka uslijed klipnog efekta tijekom spuštanja zaštitnih cijevi u budućim slučajevima te se stoga na toj dubini kanala preporuča upotreba fluida s umreženim polimerima (engl. *FPTP - fluid pressure transmission pill*), a čija svojstva ovise o temperaturi i time djeluje tako da gušći fluid ostaje na vrhu bušotine, dok je hidrostatski tlak dovoljan za održavanje bušotine pod kontrolom. Iako je ovaj slučaj prva

primjena MCD tehnologije u Abu Dhabiju, Al Awadhi et al. (2014.) smatraju kako njezina uspješnost garantira primjenu pri bušenju budućih HPHT istražnih bušotina.



Slika 8-4. Dinamički gubici tijekom bušenja „Mud Cap“ metodom na polju u Abu Dhabiju (Al Awadhi et al., 2014)

9. ZAKLJUČAK

U početku razvoja naftne industrije, pridobivalo se iz pristupačnih ležišta na malim dubinama, a ukoliko je došlo do iznenadnih poteškoća s tlakovima ili gubicima isplake odustalo se od bušotine i prešlo na drugu. Međutim, u današnje vrijeme kad je gotovo cijeli svijet temeljito istražen, vrlo rijetko dolazi do pronalaska ležišta čije privođenje eksploataciji neće uključivati komplikacije. Ležišta koja se razrađuju danas često su u dubokom podmorju, nalaze se u uvjetima visokih tlakova i temperatura, u nekonvencionalnim ležišnim stijenama ili pak ispod iscrpljenih zona. Svaka od navedenih mogućnosti predstavlja svoj komplet poteškoća, koji konvencionalno bušenje ne može savladati ili može, ali u većem vremenskom intervalu negoli je komercijalno prihvatljivo.

Bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka tehnologija je koja se zadnjih dvadeset godina rapidno razvija, a rezultati daju naslutiti kako će taj trend potrajati. Opisane dvije metode – bušenje uz održavanje stalnog tlaka na dno bušotine i „Mud Cap“ bušenje osnovne su dvije metode za bušenje slojeva s malom razlikom gradijenata slojnog tlaka i tlaka frakturiranja naslaga te slojeva koji uzrokuju velike ili totalne gubitke isplake.

Osim tendencije eksploatacije ležišta u sve nepogodnijim uvjetima, od početka razvoja bušenja konstantna je težnja prema smanjenju utjecaja istog na okoliš. Trenutno je bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka od svih metoda bušenja najsigurnije za okoliš zbog povećanog opsega opreme za sprječavanje erupcije, zatvorenog optoka isplake i općenito pomne kontrole parametara bušenja. Takva kontrola parametara omogućuje i kontrolu štetnog utjecaja varijacija tlakova na ležište, što odgovara naftnim kompanijama. Time MPD predstavlja rješenje koje zadovoljava i tijela za zaštitu okoliša i naftne kompanije te će se kao takvo sigurno dodatno razvijati i značajno popularizirati u budućnosti.

10. LITERATURA

1. AL-AMRY, K., GUZMAN, J.C., AL-HASHIM, A., HASSANEN, A.M., MOUSSA, A.H., 2016. Implementing the Pressurized Mud Cap Technique to Drilling Through Total Loss Zones: A Way to Improve Well Control While Drilling the Reservoir in Oil Well Re-Entries, U: *SPE-IADC Middle East Technology Conference and Exhibition, 26-28.01.2016.,* SPE/IADC-178218-MS
2. AL-AWADHI, F.K., Al AMERI, F.S., KIKUCHI, S., AL-HUSSEINY AFIFI, H., 2014., Making Undrillable HPHT Well Drillable Using Mud Cap Drilling, U: *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, UAE, 10-13.11.2014.*
3. ALI, A.S., DOSUNMU, A., ANYANWU, C., EVELYN, E., ODAGME, B., 2014. Optimizing the Drilling HPHT/Deep Offshore Wells Using Managed Pressure Drilling Techniques, U: *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, Lagos, Nigeria, 5-7.8.2014.,* SPE-172349-MS
4. ALMETAYEV, R., AL HOSANI, M., AL AMERI, S., AL MUTAWA, A., HUSSAIN, M.A., ABRAHAM, J., MUJAHED, S., HADJ-MOUSSA, A., DANG LE, K.P., 2018. First Nitrified Managed Pressure Drilling Application in United Arab Emirates, 2018., U: *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, 12-15.11.2018.*, SPE-193025-MS
5. CHOE, J., SCHUBERT, J.J., JUVKAM, H.C., 2004. Analyses and Procedures for Kick Detection in Subsea Mudlift Drilling, *IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas, 2-4.3.2004.*, IADC/SPE 87114
6. COLBERT, J.W., MEDLEY, G., 2002. Light Annular MudCap Drilling – A Well Control Technique for Naturally Fractured Formations, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 29.9.-2.10.2002.*, SPE 77352
7. EMAM, S.S., BRAND, P.R., GABALDON, O.R., VITYK, M., EL LEITHY, A., ABOU SHANAB, M., HAMDY, B., ABDEL-MONIEM, M., EL DESOUKY, W., EL-AZM, H., 2018. Use of Managed Pressure Drilling Paved the Way to a Massive Gas Field Discovery in Egypt Western Desert: Case History, U: *SPE/IADC Middle East Drilling Technology and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 29-31.1.2018.*, SPE/IADC-189334-MS

8. FARAHAT, A., DAHAB, A., EL-SAYED, A.H., 2017. A Successful Application of MPD with CBHP Technique in Temsah Field – a Case History, U: *Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, Ravenna, Italy, 29-31.3.2017.*

9. FOSSIL, B., SANGESLANG, S., 2004. Managed Pressure Drilling for Subsea Applications; Well Control Challenges in Deep Waters, U: *SPE/IADC Underbalanced Technology Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, 11-12.10.2004.*, SPE/IADC 91633

10. GEDGE, B., YONG, T.C., RAO, J., SINGH, H.K.D., ORACION, J., QUOC, B.T., BOT, N.V., TRAN, N.H., TRAN MINH, T.L., BUITENHUIS, R., TRAN DAI, L., WITTRY, A.E., MALPAS, P., BEAUGEOIS, A., HUU, N.N., VAN QUE, N., 2014. The Deployment of Managed Pressure Drilling Technology to Assist in the Development of Offshore HPHT Gas Condensate Fields in Vietnam – Planning, Engineering and Implementation, U: *SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Adelaide, Australia, 14-16.10.2014.*, SPE-171429-MS
11. GOODWIN, B., NAUDURI, S., MEDLEY, G., 2014. MudCap Drilling – New Variations, Drivers, Limitations, and Lessons Learned – Case Histories, U: *SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition, Madrid, Spain, 8-9.4.2004.*, SPE/IADC-168956-MS
12. GUO, W., HONGHAI, F., GANG, L., 2011. Design and Calculation of a MPD Model with Constant Bottom Hole Pressure. *Petroleum Exploration and Development*, 38 (1), str. 103.-108.
13. HANNEGAN, D., 2006. Case Studies – Offshore Managed Pressure Drilling, U: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, 24-27.9.2006.*, SPE 101855
14. HANNEGAN, D., 2007. Managed Pressure Drilling: A new way of looking at drilling hydraulics… Overcoming conventional drilling challenges, SPE Distinguished Lecturer Series
15. HANNEGAN, D., 2011. Method for Pressurized Mud Cap and Reverse Circulation Drilling from a Floating Drilling Rig Using a Sealed Marine Riser, *Canadian Patent No. 2,539,337*
16. HOSIE, D., BANSAL, R.K., CUTHBERTSON, R.L., 2004. Dynamic MudCap Drilling and Well Control System, *United States Patent No. 6,732,804 B2*
17. HUSSAIN, I., AL-ENEZI, D., AL-KHALDY, A., SULAIMAN, S., HAYAT, S., 2014. Nitrified Water as UBD Medium – Perfect Recipe for a Corrosion Nightmare:

Issues and a Solution, U: *International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar,*
19-22.1.2014., SPE-17598-MS

18. JENNER, J.W., ELKINS, H., SPRINGETT, F., LURIE, P., WELLINGS, J.S., 2005. The Continuous Circulation System: An Advance in Constant Pressure Drilling, *SPE Drilling and Completion,* 20 (3), SPE-90702-PA
19. MASI, S., MOLASCHI, C., ZAUSA, F., MICHELEZ, K., 2010. Managing Circulation Losses in a Harsh Drilling Environment: Conventional Solution vs. CHCD Through a Risk Assessment, *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 2-4.02.2010*, SPE 128225
20. MEDLEY, G., STONE, C., 2004. MudCap Drilling When? Techniques for Determining When to Switch From Conventional to Underbalanced Drilling, U: *SPE/IADC Underbalanced Technology Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA,11-12.10.2004*, SPE/IADC 91566
21. MUIS, A.R., HIDAYAT, A.M., IRAWAN, F., Floating Mud-Cap Drilling Application in Exploration Well Accelerate Reaching Target Depth While Drilling Surface Hole, U: *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, Singapore, 22-24.8.2016*, IADC/SPE-180563-MS
22. NAUDURI, A.S.S., 2009. Managed Pressure Drilling Candidate Selection, Texas A&M University, doktorska disertacija
23. NAS, S., TORALDE, J.S., WUEST, C., 2009. Offshore Managed Pressure Drilling Experiences in Asia Pacific, U: *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, the Netherlands, 17-19.3.2009.*
24. REHM, B., SCHUBERT, J., HAGHSHENAS, A., PAKNEJAD, A.S., HUGHES, J., 2008. Managed Pressure Drilling, Houston, Texas: Gulf Publishing Company
25. REYNOLDS, L., 2014. Automated Managed Pressure Drilling (MPD) System by @Balance Services: Operator Avoids Hazards While Drilling Narrow Pressure Window in Gulf of Mexico, MI Swaco
26. ROHANI, M.R., 2011. Managed-Pressure Drilling; Techniques and Options for Improving operational Safety and Efficiency, *Petroleum & Coal*, 54 (1), str. 24.-33.
27. SINGH, H.K.D., QUOC, B.T., YONG, T.C., VAN KANH, D., CUONG, N.X., TUNG, H.T., NAM, T.H., HAI, N.H., TUAN, D.A., BAO, T.N., HUNG, T.N., CUONG, N.P.H., 2018. Application of Managed Pressure Drilling on a Semisubmersible Tender-Assisted – Rig to Address Drilling Challenges in HPHT

Gas Condensate Wells, Offshore Vietnam, U: *SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Brisbane, Australia, 23-25.10.2018.*, SPE-191927-MS

Web izvori:

28. https://www.halliburton.com/en-US/ps/testing-subsea/optimized-pressure-drilling/continuous-circulation-systems/e-cd.html Pristupljeno 13.08.2019.
29. https://www.iadclexicon.org/managed-pressure-drilling-mpd/ Pristupljeno 21.09.2019.
30. https://www.iadclexicon.org/pressurized-mud-cap-drilling/ Pristupljeno 20.08.2019.
31. https://www.slb.com/drilling/rigs-and-equipment/managed-pressure-drilling-equipment/chokes-manifolds-and-consoles/superchoke Pristupljeno 08.10.2019.
32. https://www.weatherford.com/en/products-and-services/drilling/managed-pressure-drilling/rotating-control-devices/ Pristupljeno 08.10.2019.
33. https://www.slb.com/-/media/files/mi/product-sheet/superchoke-superchoke-console-ps.ashx Pristupljeno 10.11.2019.

IZJAVA

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

_____

Andrea Južnić