Bušenje uz dvojni gradijent tlaka i bušenje bez rajzer cijevi

Hećimović, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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:169:716342

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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



Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

BUŠENJE UZ DVOJNI GRADIJENT TLAKA I BUŠENJE BEZ RAJZER CIJEVI

Diplomski rad

Domagoj Hećimović

N 151

Zagreb, 2016

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

Bušenje uz dvojni gradijent tlaka i bušenje bez rajzer cijevi

Domagoj Hećimović

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

Sažetak

Predmet istraživanja ovog diplomskog rada su nekonvencionalne metode bušenja, od kojih su posebno obrađene metode bušenja uz dvojni gradijent tlaka (DGD), odnosno metode bušenja bez rajzer cijevi, metoda transporta krhotina (CTS), bušenje s povratkom isplake bez rajzer cijevi (RMR), metoda povrata isplake kroz E-cijev (EdR), bušenje uz istovremeno ugušivanje bušotine (DKD) i metoda bušenja uz primjenu koncentričnog niza bušaćih šipki (RDM). Princip rada metode bušenja uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka opisan je na temelju simulacije. Proporcionalno s povećanjem dubina istraživanja za naftom i plinom povećava se i kompleksnost operacija te problemi koji se mogu javiti prilikom njih. Pregledom literature je ustanovljeno kako su najveći problemi mala razlika između slojnog tlaka i tlaka frakturiranja („bušaći prozor“). Upravo korištenje obrađenih metoda, omogućava kvalitetnije bušenje u takvim zahtjevnim uvjetima. Razmišljanje naftnih kompanija polako se mijenja, u skladu s čime se počinju sve više koristiti nekonvencionalne metode koje postepeno zamjenjuju konvencionalne.

Ključne riječi: bušenje, bušenje uz dvojni gradijent tlaka, bušenje bez rajzer cijevi, nekonvencionalne metode

Diplomski rad sadrži: 64 stranice, 1 tablicu, 36 slika i 50 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

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

Voditelj: Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF
Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redoviti profesor RGNF
Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF

Datum obrane: 16.12.2016., Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

Dual gradient drilling methods and riserless drilling

Domagoj Hećimović

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

Abstract

The subjects of this thesis are unconventional drilling methods, mainly dual gradient drilling methods, particularly riserless drilling methods, cuttings transport system (CTS), riserless mud return (RMR), E-duct return (EdR), dynamic kill drilling (DKD) and reelwell drilling method (RDM). The dual gradient drilling method is described through a simulation in order to explain the main functions. With the increase of the depth of offshore exploration, the complexity of operations and the number of problems that follow also proportionally increases. By reviewing the available literature, it was concluded that the main problem occurring in these conditions are the narrowing of the pore pressure and fracture pressure margins, otherwise known as the drilling window. Thus, by using the methods covered in this thesis, it becomes possible to drill more efficiently in such demanding conditions. The consensus of the drilling industry is slowly shifting and methods once known as conventional are slowly being replaced by unconventional ones.

Keywords: drilling, dual gradient drilling, riserless drilling, unconventional methods

Thesis contains: 64 pages, 1 table, 36 figures and 50 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Full Professor Zdenko Krištafor, PhD

Reviewers: Full Professor Zdenko Krištafor, PhD
Full Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD
Assistant Professor Vladislav Brkić, PhD

Date of defense: December 16, 2016., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS TABLICA……..……..……I
POPIS SLIKA...…….……II
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA ...……IV
1. Uvod 1
2. Bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka i u uvjetima podtlaka 2
3. Metoda dvojnih gradijenata tlaka 5
3.1. Princip rada metode dvojnih gradijenata 7
3.2. Povijest i prethodno provedena istraživanja (bušenje uz dvojni gradijent tlaka) . 16
4. Podjela metoda bušenja uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka 19
4.1. Metode dvojnih gradijenata temeljene na utiskivanju u prstenasti prostor..... 20
4.2. Metode dvojnih gradijenata temeljene na korištenju podvodnih pumpi za podizanje fluida 21
5. Prednosti i nedostaci bušenja uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka..... 30
5.1. Prednosti bušenja uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka 30
5.2. Nedostaci bušenja uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka 32
6. Metode bušenja bez rajzer cijevi 33
6.1. Metoda transporta krhotina 34
6.2. Metoda povrata isplake bez rajzer cijevi 35
6.3. Metoda povrata isplake kroz E-cijev 48
6.4. Metoda bušenja uz istovremeno ugušivanje bušotine..... 51
6.5. Metoda bušenja uz primjenu koncentričnog niza bušaćih šipki 53
7. Zaključak 58
8. Literatura 60

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Empirijske formule za računanje parametara kontrolera……..…10

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Ekonomska usporedba različitih metoda bušenja. 3
Slika 3-1. Shematski prikaz duljine stupca fluida različite gustoće kod metode bušenja uz dvojni gradijent tlaka (lijevo) i usporedba s konvencionalnom metodom (desno). 5
Slika 3-2. Bušenje uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka 6
Slika 3-3. Jednostavni linearni algoritam 7
Slika 3-4. Način rada PID kontrolera 9
Slika 3-5. Simuliranje operacije dodavanja šipki 13
Slika 3-6. Protoci kroz različite dijelove sustava 14
Slika 3-7. Razina fluida u rajzer cijevi 15
Slika 3-8. Usporedba referentne i mjerene vrijednosti tlaka na dno 16
Slika 4-1. Podjela metoda dvojnog gradijenta 19
Slika 4-2. Metoda smanjenja hidrostatskog tlaka utiskivanjem plina 20
Slika 4-3. Metoda smanjenja hidrostatskog tlaka utiskivanjem suspenzije staklenih mikrokuglica u isplaci. 21
Slika 4-4. Metoda bušenja uz primjenu podvodne pumpe za podizanje isplake 22
Slika 4-5. Protupovratni ventil za bušaće šipke 24
Slika 4-6. Povodni rotirajući preventer 24
Slika 4-7. Shema pogona pumpe za podizanje isplake morskom vodom 25
Slika 4-8. „EC-drill“ metoda 26
Slika 4-9. Ured i kontrolni kontejner 28
Slika 4-10. Podvodni pumpni modul 29
Slika 4-11. Metoda povrata isplake bez rajzer cijevi 30
Slika 5-1. Usporedba jedinstvenog (lijevo) i dvojnog gradijenta tlaka (desno) 31
Slika 5-2. Princip rada protupovratnog ventila 32
Slika 6-1. Metoda transporta krhotina na morskom dnu 34
Slika 6-2. Komponente sustava za bušenje uz primjenu metode povrata isplake bez rajzer cijevi u dubokom (lijevo) i ultra dubokom moru (desno) 36
Slika 6-3. Glavni dijelovi metode povrata isplake bez rajzer cijevi 39
Slika 6-4. Sastavni dijelovi usisnog modula 40
Slika 6-5. Vrste temeljnih ploča, zaravnjena baza (lijevo) i posuda za prikupljanje isplake (desno) 41
Slika 6-6. Podvodni pumpni modul 42
Slika 6-7. Dio površinske opreme 44

Slika 6-8. Usisna cijev (lijevo) i donji spojni zglob spojen na sidrišni sustav (desno) 44
Slika 6-9. Postavljanje i dijelovi sidrišnog sustava 46
Slika 6-10. Vitlo nosivosti 25 t (lijevo) i vitlo nosivosti 10 t (desno) 47
Slika 6-11. Metoda povrata isplake kroz E-cijev 49
Slika 6-12. Shema uređaja za miješanje isplake metode bušenja uz istovremeno ugušivanje bušotine..... 53
Slika 6-13. Metoda bušenja uz primjenu koncentričnog niza bušaćih šipki 55
Slika 6-14. Način rada metode bušenja uz primjenu koncentričnog niza bušaćih šipki 56

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

APWD	uređaj za mjerenje anularnog tlaka tijekom bušenja (engl. *annular pressure while drilling*)	
B_p	protutlak koji ostvaruju pumpe (engl. *backpressure pumps*)	[Pa]
BHA	sklop krutog alata (engl. *bottom hole assembly*)	
BHP	tlak na dno (P) (engl. *bottom hole pressure*)	[Pa]
BOP	preventer (engl. *blow-out preventer*)	
BP	British Petroleum	
CML	metoda kontrole razine isplake u prstenastom prostoru (engl. *controlled annular mud level*)	
CTS	metoda transporta krhotina (engl. *cuttings transport system*)	
d	broj grešaka	[-]
D	dubina	[m]
D_{fi}	dubina kontakta dvaju fluida	[m]
DFV	dvostruki protupovratni ventil u sklopu alatke za preusmjeravanje (engl. *dual float valve*)	
DGD	metoda dvojnih gradijenata (engl. *dual gradient drilling*)	
DKD	bušenje uz istovremeno ugušivanje bušotine (engl. *dynamic kill drilling*)	
DSV	protupovratni ventil za bušaće šipke (engl. *drill string valve*)	
e	signal greške	[-]
ECD	ekvivalentna gustoća isplake u cirkulaciji (engl. *equivalent circulating density*)	[kg/m^3]
EdR	metoda povrata isplake kroz E-cijev (engl. *E-duct return*)	
F_a	faktor trenja kroz prstenasti prostor	[-]
F_b	faktor trenja kroz dlijeto	[-]
F_d	faktor trenja kroz bušaće šipke	[-]
g	ubrzanje sile teže (9,80665)	[m/s^2]
GoM	Meksički zaljev (engl. *Gulf of Mexico*)	
H_2S	sumporovodik	
h_z	duljina praznog dijela rajzer cijevi	[m]
h_{mv}	visina vode u rajzer cijevi	[m]
HHP	nosač za rukovanje cijevima (engl. *hose handling platform*)	

HOJ	zglob vješalice (engl. *hang off joint*)	
HOM	modul za vješanje (engl. *hang off module*)	
HPHT	stanje visokog tlaka i visoke temperature (engl. *high pressure high temperature*)	
IADC	međunarodno udruženje bušača (engl. *International Association of Drilling Contractors*)	
JIP	zajednički projekt s gospodarstvom (engl. *Joint Industry Project*)	
k_c	konstanta ventila	[-]
K_p	proporcionalna dobit	[-]
K_u	najveća dobit	[-]
LDJ	donji spojni zglob (engl. *lower docking joint*)	
LRRS	metoda povrata isplake s dna rajzer cijevi (engl. *low riser return system*)	
M	integrirana gustoća po poprečnom presjeku duž protočne linije	[-]
MLP	podvodna pumpa za podizanje povratnog toka isplake (engl. *mudlift pump*)	
MPC	cementiranje u uvjetima kontroliranog tlaka (engl. *managed pressure cementing*)	
MPD	bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka (engl. *managed pressure drilling*)	
MR	povezne cijevi, rajzer cijevi (engl. *riser, marine riser*)	
MRL	cijev za povratni tok isplake (engl. *mud return line*)	
N_2	dušik	
NCS	Norveški kontinentalni šelf (engl. *norwegian continental shelf*)	
NPT	neproduktivno vrijeme (engl. *non-productive time*)	[-]
OBD	bušenje u uvjetima nadtlaka (konvencionalno bušenje) (engl. *overbalanced drilling*)	
P_c	tlak razvodnika	[Pa]
P_{din}	dinamički tlak na dno	[Pa]
P_f	pad tlaka zbog trenja	[Pa]
P_h	hidrostatski tlak	[Pa]
$P_{h,fluid1}$	hidrostatski tlak prvog fluida	[Pa]
$P_{h,fluid2}$	hidrostatski tlak drugog fluida	[Pa]
$P_{h,ukupi}$	ukupan hidrostatski tlak	[Pa]

P_k	hidrostatski tlak isplake za ugušivanje	[Pa]
P_{mv}	hidrostatski tlak morske vode	[Pa]
P_p	tlak pumpe	[Pa]
P_{rb}	modificiran parametar tlaka	[Pa]
P_{sl}	slojni tlak	[Pa]
P_{stat}	statički tlak na dno	[Pa]
PID	proporcionalni-integralni-derivativni kontroler (engl. *propotional integral derivate*)	
POD	zaštitni oceanski uređaj (engl. *protective oceanic device*)	
q_b	protok kroz dlijeto (mlaznice)	[m^3/s]
q_{bpp}	protok iz pumpi koje ostvaruju protutlak	[m^3/s]
q_c	protok kroz razvodnik	[m^3/s]
q_p	protok iz isplačne pumpe	[m^3/s]
q_{res}	protok iz ležišta	[m^3/s]
r	referentna vrijednost	[-]
RBOP	rotirajući preventerski sklop (engl. *rotating blowout preventer*)	
RD	bušenje bez rajzer cijevi (engl. *riserless drilling*)	
RCD	rotirajući kontrolni uređaj (engl. *rotating control device*)	
RDJ	otpusni rajzer zglob (engl. *riser dump joint*)	
RDM	metoda bušenja uz primjenu koncentričnog niza bušaćih šipki (engl. *reelwell drilling method*)	
RMR	povrat isplake bez rajzer cijevi (engl. *riserless mud recovery*)	
ROV	podvodna ronilica (engl. *remotely operated vehicle*)	
SEM	podvodni elektronski modul (engl. *subsea electronics module*)	
SMD	metoda bušenja uz primjenu podvodnog podizanja isplake (engl. *subsea mudlift drilling system*)	
SMO	usisni modul (engl. *suction module*)	
SPM	podvodni pumpni modul (engl. *subsea pump module*)	
SPU	procesna jedinica za uklanjanje krhotina iz isplake (engl. *solids processing unit*)	
SRD	povodni rotirajući preventer (engl. *subsea rotating device*)	
T_d	derivativna konstanta vremena	[-]
T_i	konstanta integralnog vremena	[-]
T_u	duljina perioda između oscilacija	[-]

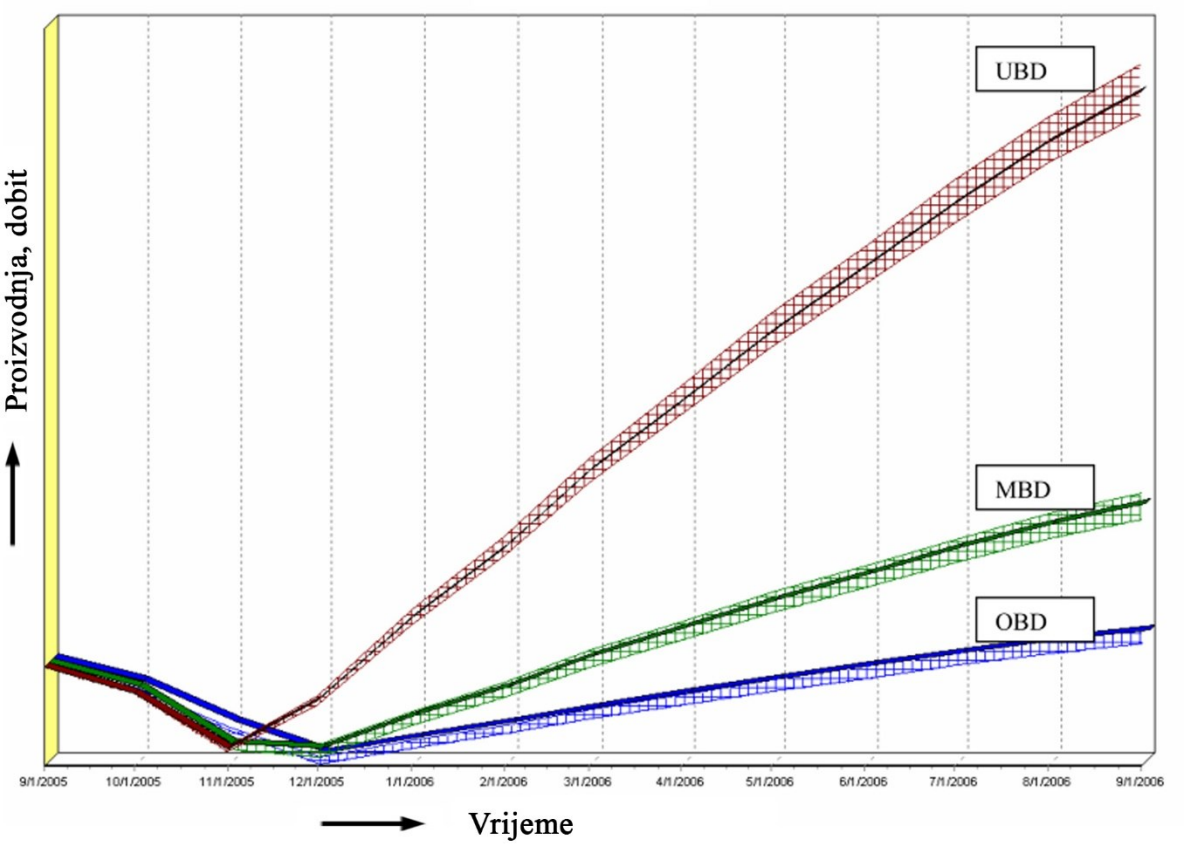
TDA	adapter za vršni pogon (engl. *top drive adaptor*)	
TDS	vršni pogon (engl. *top drive system*)	
TVD	vertikalna dubina (engl. *true vertical depth*)	[m]
u_0	ulazna vrijednost	[-]
u	izlaz kontrolera	[-]
UBD	bušenje u uvjetima podtlaka (engl. *underbalanced drilling*)	
UDJ	gornji spojni zglob (engl. *upper docking joint*)	
V_a	volumen prstenastog prostora	[m^3]
V_d	volumen bušaćih šipki	[m^3]
VSD	pogon promjenjive brzine (engl. *variable speed drive*)	
VFD	pogon promjenjive frekvencije (engl. *variable frequency drive*)	
VIV	vibracije uzrokovane vrtlozima (engl. *vortex induced vibration*)	
y	mjerena vrijednost	[-]
z_c	otvaranje ventila	[-]
β_a	volumni modul prstenastog prostora	[-]
β_d	volumni modul bušaćih šipki	[-]
γ_r	relativna gustoća	[-]
ρ_a	gustoća fluida u prstenastom prostoru	[kg/m^3]
ρ_z	gustoća zraka	[kg/m^3]
ρ_d	gustoća fluida u bušaćoj šipci	[kg/m^3]
ρ_i	gustoća isplake	[kg/m^3]
ρ_{mv}	gustoća morske vode	[kg/m^3]
τ	ukupna duljina trajanja grešaka	[s]

1. Uvod

Predmet istraživanja ovog rada su nekonvencionalne metode bušenja. Pošto se odobalno bušenje premješta sve dalje u duboka i ultra duboka mora, potrebna su sve veća postrojenja 5., 6. pa i 7. generacije. Također, cijena izrade tih postrojenja je velika i većina malih, ali i velikih kompanija si ih ne može priuštiti, pogotovo u današnjoj situaciji gdje je cijena nafte na najnižoj razini u proteklom desetljeću. Stoga se nastoji razvijati nove, učinkovitije nekonvencionalne metode, poput bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka i bušenja ispod ravnoteže koja se danas sve više primjenjuju. Jedna od njih je bušenje primjenom dvojnog gradijenta tlaka koja će biti obrađena u ovom diplomskom radu. Cilj rada je prikazati metode bušenja uz dvojni gradijent tlaka, osnovnu opremu te njihove prednosti nad konvencionalnim metodama. U radu je također izdvojena metoda bušenja bez rajzer cijevi (engl. *riser, marine riser*, MR), kao još učinkovitija metoda jer dopušta bušenje bez korištenja teških i velikih rajzer cijevi. Iako u industriji još postoji rezerviranost spram novih metoda, sve je očitije kako su konvencionalni načini bušenja u blizini obale stvar prošlosti, stoga je svrha ovog rada približiti buduće metode današnjoj upotrebi.

2. Bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka i u uvjetima podtlaka

Uz konvencionalne metode bušenja, koje se uglavnom koriste na kopnenim postrojenjima, koriste se i nekonvencionalne metode. One podrazumijevaju uspostavljanje određenog tlačnog režima tijekom bušenja, kao što su bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka (engl. *managed pressure drilling*, MPD) i bušenje u uvjetima podtlaka (engl. *underbalanced drilling*, UBD). Prema IADC-u (engl. *International Association of Drilling Contractors*, IADC), bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka je definirano kao prilagođavajući proces bušenja koji se koristi za točnu kontrolu tlaka u prstenastom prostoru duž cijele bušotine (Ostroot et al., 2007). Ova se metoda, za razliku od konvencionalnog bušenja, temelji na zatvorenom sustavu isplake, što omogućava precizniju kontrolu protoka isplake i profila tlakova u cjelokupnom kanalu bušotine (Rohani, 2011). Na taj način dodavanjem određenog protutlaka pomoću sapnice ili pumpe, djelovanje na tlak na dno (P) (engl. *bottom hole pressure*, BHP) bušotine postaje efikasnije i brže. Bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka se pokazalo kao ekonomski isplativija metoda kada je cilj smanjenje problema prilikom bušenja. No, ono se ne može mjeriti s metodom bušenja u uvjetima podtlaka kada je riječ o smanjenju oštećenja formacije, povećanju proizvodnje, dopuštanju karakterizacije ležišta ili otkrivanju produktivnih slojeva koji nisu vidljivi kada se formacija buši u uvjetima nadtlaka (konvencionalna metoda). Slika 2-1 prikazuje usporedbu tri metode bušenja u uvjetima nadtlaka (engl. *overbalanced drilling*, OBD), kontroliranog tlaka i podtlaka. Na apcisi se nalazi proteklo vrijeme kroz period od jedne godine te na ordinati ukupna zarada u tom periodu odnosno povećanje proizvodnje. Schmeigel (2005) definira bušenje u uvjetima podtlaka kao proces bušenja pri kojem je hidrostatski tlak bušotinskog fluida namjerno podešen na vrijednosti manje od vrijednosti tlaka formacije koju se buši.



Slika 2-1. Ekonomska usporedba različitih metoda bušenja (Ostroot et al., 2007).

Problemi tijekom bušenja koji su potaknuli razvoj i primjenu bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka ili podtlaka su sljedeći (Ostroot et al., 2007):

- potreba za eliminiranjem ili smanjenjem oštećenja ležišnih stijena,
- mali „bušaći prozor“ (malo područje između gradijenta slojnog tlaka i tlaka frakturiranja),
- želja za smanjenjem cijene izrade bušotine (minimaliziranje gubljenja isplake, eliminiranje diferencijalnog obljepljivanja),
- povećanje brzine bušenja,
- produljenje radnog vijeka dlijeta,
- povećanje sigurnosti procesa bušenja.

Za razliku od bušenja u uvjetima podtlaka, bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka je poželjna metoda u slučaju problema sa stabilnošću kanala bušotine, potencijalno velikog izdvajanja sumporovodika (H_2S), postojeće regulative koje zabranjuju paljenje na baklji ili proizvodnju tijekom bušenja (Ostroot et al., 2007). U konačnici, do prevage bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka nad bušenjem u uvjetima podtlaka, dolazi zbog povećane nestabilnost kanala bušotine tijekom bušenja te visokih cijena bušaće opreme.

Bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka može se podijeliti na sljedeće metode:

- metoda konstantnog tlaka na dno,
- metoda „MudCap“ bušenja pod tlakom,
- metoda kontrole povratnog toka isplake,
- **metoda dvojnih gradijenata**.

Metoda konstantnog tlaka na dno podrazumijeva korištenje isplake manje gustoće koja ostvaruje tlak približan slojnom tlaku (Vieria et al., 2008). Prilagođavanjem protutlaka na dno omogućuje se održavanje konstantne ekvivalentne gustoće isplake (engl. *equivalent circulating density*, ECD) tijekom cjelokupnog procesa bušenja uzimajući u obzir statičke ili dinamičke uvjete. ECD se javlja samo u dinamičkim uvjetima te se ostvaruje dodatan tlak na dno zbog dodatnog pada tlaka u prstenastom prostoru. No, pri statičkim uvjetima, kako bi se spriječio potencijalan dotok slojnog fluida u bušotinu, potrebno je održavati dodatni tlak na dno (Vieria et al., 2008).

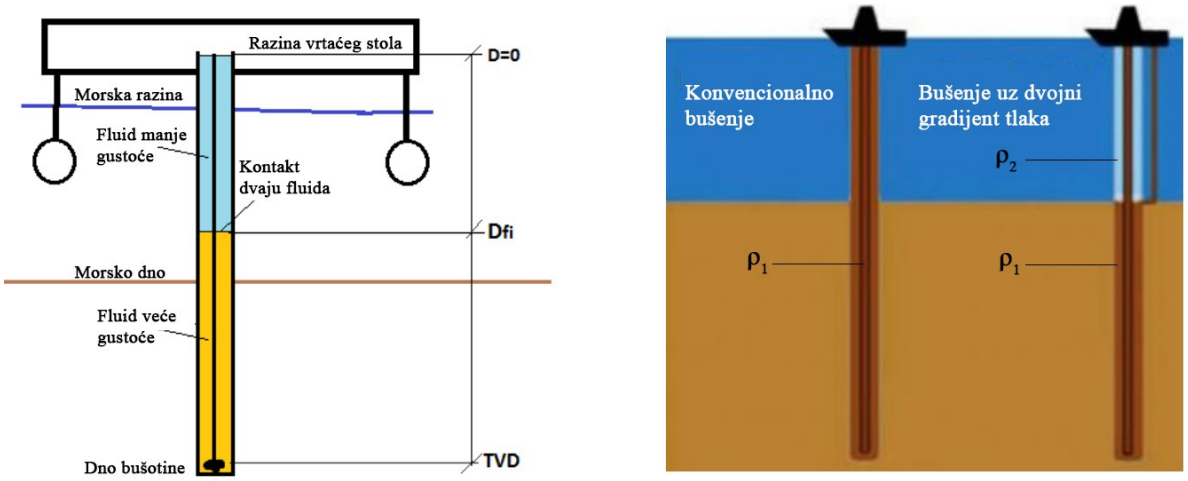
Takozvana metoda „MudCap“ bušenja pod tlakom vrši se u uvjetima ozbiljnog ili totalnog gubitka isplake u stijenu, a podrazumijeva upotrebu dvije vrste fluida. Otežana isplaka ostaje u prstenastom prostoru kao svojevrsna „kapa“ odnosno nepropusna barijera za isplaku manje gustoće koja se nalazi u području zone gubljenja. Prednost ove metode je mogućnost korištenja jeftinijeg fluida manje gustoće (čak i morske vode), čime se postižu veće brzine bušenja i manji negativan utjecaj na stijenu (Urselmann et al., 1999).

Metoda kontrole povratnog toka pruža mogućnost veće razine zaštite i sigurnosti budući da omogućuje odvajanje toka isplake korištenjem sapnice. Nadalje, rotirajuća glava ugrađuje se na preventerski sklop, čime se izbjegava potreba za zatvaranjem preventera i umanjuje se potencijalno izlijevanje dotoka na podište tornja. Također, za bušenje primjenom ove metode potrebno je ugraditi dva hidraulička ventila, konvencionalan vod prema čistaćima isplake te vod koji završava sapnicom postrojenja (Kulakofsky et al., 2006).

Metoda dvojnih gradijenata biti će detaljno opisana u nastavku rada.

3. Metoda dvojnih gradijenata tlaka

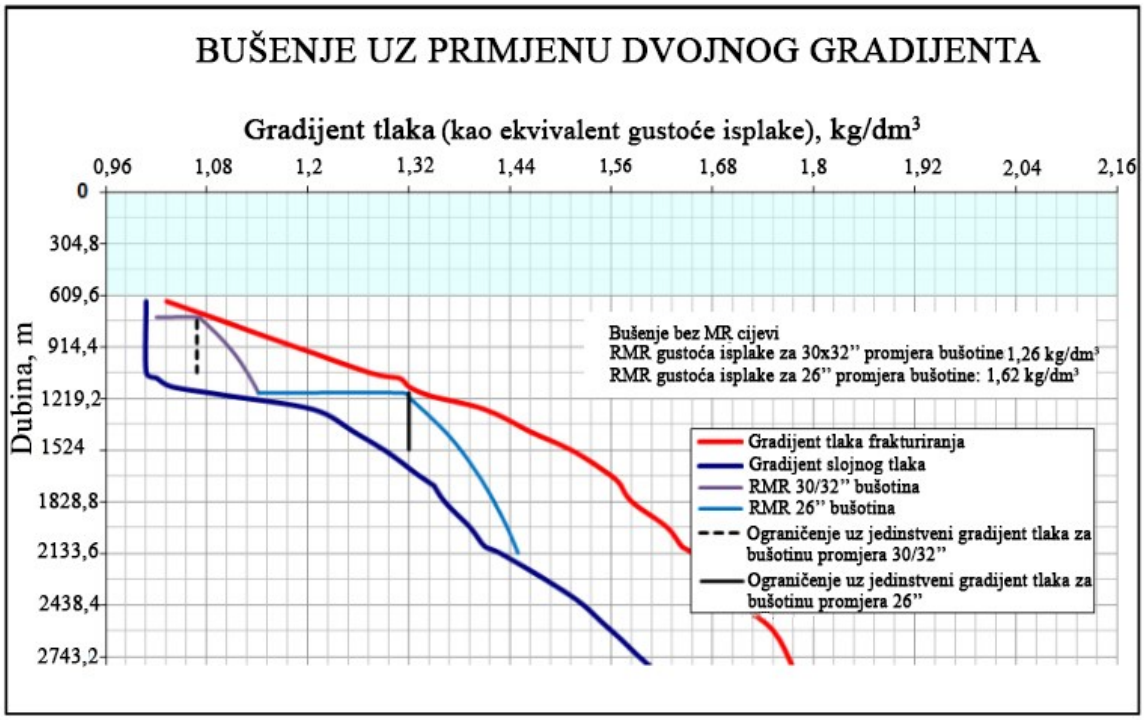
Metoda dvojnih gradijenata tlaka (engl. *dual gradient drilling*, DGD) kao jedna od metoda bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka, podrazumijeva uporabu podvodnih pumpi, fluide različitih gustoća ili njihovu kombinaciju kako bi se kontrolirao gradijent tlaka u bušotini (Stave, 2014). Temeljem toga moguće je povećanje učinkovitosti bušenja, sigurnosti te smanjenje neproduktivnog vremena. Također, ostvarivanje dvojnog gradijenta moguće je olakšavanjem fluida dodatkom čvrstih materijala male gustoće, drugim tekućinama ili plinovima. Ova metoda koristi se u odobalnom području gdje stupac morske vode ostvaruje dodatno opterećenje na stijensku masu. Slika 3-1 shematski prikazuje metodu dvojnih gradijenata (lijevo) te usporedbu s konvencionalnim bušenjem (desno). Vidljiva je razlika u korištenju fluida različitih gustoća radi postizanja željenog tlaka na dno bušotine.



Slika 3-1. Shematski prikaz duljine stupca fluida različite gustoće kod metode bušenja uz dvojni gradijent tlaka (lijevo) i usporedba s konvencionalnom metodom (desno) (Gaup, 2012).

Budući da su se odobalna istraživanja nafte i plina postupno premještala od dubokih mora (dubina mora do 1 500 m) do ultra-dubokih mora (dubina mora iznad 1 500 m), javili su se brojni problemi tijekom bušenja. Slika 3-2 prikazuje marginu gradijenta slojnog tlaka i tlaka frakturiranja (tzv. bušaći prozor) te usporedbu bušenja uz jedinstveni gradijent tlaka i dvojni gradijent tlaka. Na dijagramu je prikazan tipičan profil gradijenta tlaka isplake za različite uvjete bušenja bez rajzer cijevi. Kad bi se u bušotini promjera 0,762 m/0,813 m (30“/32“) bušilo uz korištenje rajzer cijevi, gustoća isplake bi bila limitirana na 1,07 kg/dm^3, dok se uz metodu povrata isplake bez rajzer cijevi (engl. *riserless mud recovery*, RMR) omogućuje korištenje isplake od 1,26 kg/dm^3. U bušotini promjera 0,66 m (26“) umjesto isplake gustoće 1,32 kg/dm^3 mogla bi se koristiti isplaka gustoće 1,62 kg/dm^3. To omogućuje

„otvaranje bušaćeg prozora“ tj. dovodi do povećanja margina uz bušenje čime se dopušta povećanje dubine bušenja (Stave et al., 2014). Razlika dubine između bušenja primjenom jedinstvenog gradijenta i primjenom dvojnog gradijenta, izraženija je za drugu sekciju prikazanu na dijagramu. Upravo mogućnost postavljanja duljih kolona zaštitnih cijevi rezultira u konačnici manjim troškovima vezenim uz količinu potrebnih zaštitnih cijevi. Nadalje, za razliku od „pumpaj i ispusti“ (engl. *pump and dump*) metode nije potrebno bušiti tako da tlak bude blizu pornog tlaka. Budući se povratni tok cirkulira do površine moguće je bušiti uz veći nadtlak nego pri konvencionalnim metodama, što unaprjeđuje kvalitetu kanala bušotine i smanjuje rizik od erupcija plitkih plinova.



Slika 3-2. Bušenje uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka (Stave et al., 2014).

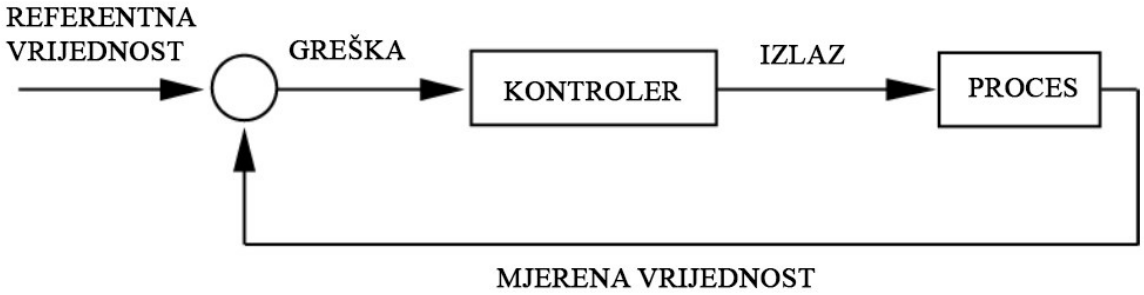
Neki od problema pri bušenju u dubokim morima su (Peng et al., 2016): 1) rajzer cijevi velikog promjera, težine i kapaciteta. Njihova veličina zahtijeva plovilo velike težine i skladišnog kapaciteta, što može uvelike unazaditi razvoj tog plovila. Također povećani protok kroz prstenasti prostor zahtijeva goleme količine fluida, te su za takvo nešto potrebne pumpe dovoljne snage za iznošenje krhotina; 2) zaštita okoliša, nepoznate i nepravilne oceanske struje i drugi marinski uvjeti povećavaju problematiku bušenja u dubokim morima; 3) stabilnost kanala bušotine ili uski „bušaći prozori“. Formacije šejla su zahtjevna prepreka, pogotovo u formaciji koja ima bliske vrijednosti slojnog tlaka i tlaka frakturiranja (bušaći prozor); 4) reološka svojstva isplake i problemi nastajanja hidrata. Zbog niske temperature u dubokomorskom okolišu povećava se gustoća, viskoznost te čvrstoća gela fluida, to

pogotovo vrijedi za sintetičke isplake te isplake na bazi ulja. Prirodni plin i voda pod uvjetima hladne temperature i određenog tlaka mogu stvarati hidrate, koji mogu začepiti gornji dio prstenastog prostora bušotine, preventer (engl. *blow-out preventer*, BOP) te druge cijevi za povrat isplake (engl. *return lines*).

3.1. Princip rada metode dvojnih gradijenata

Princip rada određenog sustava bušenja zasniva se na automatizaciji procesa putem kontrolera. Kako bi se automatizirali procesi potreban je hidraulički model. U nastavku će biti objašnjen način podešavanja kontrolera radi što boljih rezultata, prikaz odabranog hidrauličkog modela te kako ga primijeniti na metodu dvojnih gradijenata. Dan je osnovni primjer rada sustava.

Kako bi se automatizirao postupak dodavanja šipki tijekom bušenja potrebno je poznavati teoriju kontrole. Kontrola linearnih logaritama koristi se u 95% industrijskih kontrolnih potreba. Kontroler (engl. *controller*) povratne veze (engl. *feedback*) se koristi kako bi doveo radne uvjete procesa do predodređene referentne vrijednosti. To se osigurava mijenjanjem vrijednosti izlaza kontrolera koji je temeljen na razlici između mjerene i referentne vrijednosti, što se zove greška. Cilj kontrolnog algoritma je smanjiti signal greške u sustavu do nule te zadržati dogovorenu referentnu vrijednost. Na slici 3-3 prikazan je jednostavan algoritam.



Slika 3-3. Jednostavni linearni algoritam (Güyagüler et al., 2009).

Jednadžba kojom se opisuje iznos greške je (Nygaard i Godhavn, 2013):

$$e = r - y \tag{3-1}$$

gdje je e signal greške; r referentna vrijednost te y mjerena vrijednost.

U nastavku su navedena tri najčešće korištena kontrolera (proporcionalni, integralni i derivativni) te način na koji se zajedno primjenjuju radi poboljšanja procesa upravljanja.

Proporcionalni kontroler (P) je najjednostavniji. Izlaz je proporcionalan ulaznom signalu greške, a promjene su proporcionalne trenutnoj vrijednosti greške. Proces će postići referentnu vrijednost brže u slučaju veće proporcionalne dobiti. Ukoliko je proporcionalna dobit prevelika, sustav će postat nestabilan. Jednadžba koja opisuje proporcionalni kontroler je (Nygaard i Godhavn, 2013):

$$u = u_0 + K_p e \tag{3-2}$$

gdje je u izlaz kontrolera; u_0 ulazna vrijednost te K_p proporcionalna dobit.

Integralni (I) kontroler (engl. *reset control*) integrira ulazni signal greške kako bi promijenio mjerenu vrijednost po stopi koja je proporcionalna greški. Nadalje, zbraja sve prošle greške i njihovu duljinu trajanja kako bi ubrzao promjene izlaza radi bržeg postizanja referentne vrijednosti. Mjerene vrijednosti svode (resetiraju) se s obzirom na broj zbrojenih vrijednosti grešaka. Previsok iznos uzrokovati će daleko veći izlazni signal od referentne vrijednosti. Jednadžba koja opisuje integralni kontroler je (Nygaard i Godhavn, 2013):

$$u = K_p \frac{1}{T_i} \int_0^t e d\tau \tag{3-3}$$

gdje je T_i konstanta integralnog vremena; d broj grešaka te τ ukupna duljina trajanja grešaka.

Derivativni (D) kontroler služi kao sredstvo suzbijanja prevelikog doprinosa integralnog kontrolera, a razmatra promjenu ulazne greške i usporava promjenu izlaza kontrolera. Jednadžba koja opisuje derivativni kontroler je (Nygaard i Godhavn, 2013):

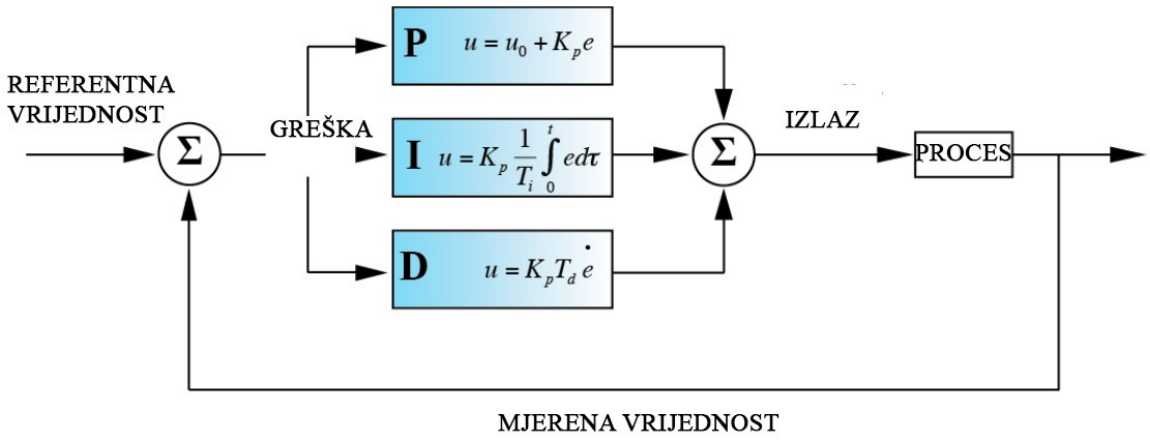
$$u = K_p T_d \dot{e} \tag{3-4}$$

gdje je T_d derivativna konstanta vremena.

Kada se kombiniraju sva tri tipa dobiva se PID kontroler koji je opisan sljedećom jednadžbom (Nygaard i Godhavn, 2013):

$$u = u_0 K_p e + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e d\tau + K_p T_d \dot{e} \tag{3-5}$$

Na slici 3-4 prikazan je način rada PID kontrolera. Rijetko se sva tri prethodna tipa koriste zasebno, no za većinu primjena dovoljno je koristiti prva dva, bez derivativnog. Tada se kontroler naziva PI gdje je vrijednost T_d jednaka nuli (Güyagüler et al., 2009; Saeed et al., 2012; Nygaard i Godhavn, 2013).



Slika 3-4. Način rada PID kontrolera (Güyagüler et al., 2009).

Kako bi PID kontroler radio što bolje, njegovi parametri K_p, T_i i T_d trebaju biti podešeni točnoj vrijednosti, za što se koristi Zergler-Nichols metoda podešavanja kontrolera. Podešavanje parametra je najvažniji korak u konstrukciji kontrolnog sustava. Podešavanje PID kontrolera se odvija u seriji eksperimenata ugađanja i empirijskih vrijednosti dobivenih ovim eksperimentima.

Zergler-Nichols metoda podešavanja se odvija na sljedeći način (Nygaard i Godhavn, 2013):

1) T_i vrijednost se postavlja jako visoko i T_d je jednak nuli kako bi se onesposobili integralni i derivativni tip,
2) s varirajućim K_p, pokušaji se provode sve dok se ne pojave oscilacije s konstantnom amplitudom i frekvencijom,
3) bilježi se K_u (najveća dobit),
4) bilježi se T_u, duljina perioda između oscilacija,

5) parametri kontrolera se izračunavaju upotrebom empirijskih formula iz tablice 3-1.

Tablica 3-1. Empirijske formule za računanje parametara kontrolera (Güyagüler et al., 2009).

KONTROLER	**K_p**	**T_i**	**T_d**
P	$K_u/2$	∞	0
PI	$K_u/2{,}2$	$T_u/1{,}2$	0
PID	$K_u/1{,}7$	$T_u/2$	$T_u/8 = T_i/4$

Pošto se odaziv procesa mijenja kroz vrijeme, teško je postići oscilacije s konstantnom amplitudom i frekvencijom. Stoga se uzima prosječna duljina oscilacija koja je obično dovoljna za uporabu u izračunima (Güyagüler et al., 2009; Nygaard i Godhavn, 2013).

Kako bi se automatizirao kontrolni sustav tijekom bušenja, potreban je hidraulički model. Unatoč razvoju nekolicine naprednih hidrauličkih modela, njihova složenost predstavlja glavni nedostatak. Kaasa et al. (2011) razvili su model za bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka, koji modifikacijom može biti primjenjiv za metodu dvojnih gradijenta. Zbog konstantno mijenjajućih uvjeta tijekom bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka, broj obavljenih mjerenja u većini slučajeva nije dovoljan da održi sve parametre kalibriranima. Kaasa et al. (2011) razvili su pojednostavljen hidraulički model, koji koristi osnovu dinamike fluida kako bi objasnio hidrauliku bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka. Pošto je dinamika ta koja komplicira model, nepotrebna dinamika je zanemarena u Kaasa modelu i jedino su dominantne dinamike sustava uključene. Kako bi pojednostavio svoj model, Kaasa je uklonio dinamiku koja se mijenja brže nego što kontrolni sustav može reagirati. Nadalje, uklonio je sporu dinamiku, koja se može riješiti povratnom vezom kontrolera. Također, grupirao je parametre koje je nemoguće raspoznati. Kaasa-ov model radi na pretpostavci protočnog uniformnog uzorka u bušaćim šipkama kroz cijelu duljinu i kroz prstenasti prostor. Na ovaj se način bušotina može podijeliti na dva različita kontrolna volumena s različitim dinamikama (Kaasa et al., 2011; Nygaard i Godhavn, 2013).

Kaasa model se obično predstavlja s narednim jednadžbama:

Dinamika tlaka pumpe dana je jednadžbom (Nygaard i Godhavn, 2013):

$$\dot{P}_p = \frac{\beta_d}{V_d}\left(q_p - q_b\right) \tag{3-6}$$

Dinamika tlaka razvodnika dana je jednadžbom (Nygaard i Godhavn, 2013):

$$\dot{P}_c = \frac{\beta_d}{V_d}\left(q_b + q_{res} + q_{bpp} - q_c - \dot{V}_a\right) \tag{3-7}$$

Dinamika protoka kroz mlaznice dana je jednadžbom (Nygaard i Godhavn, 2013):

$$\dot{q_b} = \frac{1}{M}\Big(\left(P_p - P_c\right) - (F_d + F_b + F_a)q_b^2 + (\rho_d - \rho_a)gh\Big) \tag{3-8}$$

gdje je q_p protok iz pumpe; q_b protok kroz dlijeto (mlaznice); q_{res} protok iz ležišta; q_{bpp} protok iz pumpi koje ostvaruju protutlak; q_c protok kroz razvodnik opisuje jednadžba (Nygaard i Godhavn, 2013):

$$q_c = z_c k_c \sqrt{\frac{p_c}{\rho_a}} \tag{3-9}$$

gdje je z_c otvaranje ventila; k_c konstanta ventila; p_c tlak razvodnika; ρ_a gustoća fluida u prstenastom prostoru.

Parametri bušotine (Nygaard i Godhavn, 2013):

- β_d je volumni modul bušaćih šipki, [-]
- V_d volumen bušaćih šipki, [m^3]
- β_a volumni modul prstenastog prostora, [-]
- V_a volumen prstenastog prostora, [m^3]
- M integrirana gustoća po poprečnom presjeku duž protočne linije, [-]
- F_d faktor trenja kroz bušaće šipke, [-]
- F_b faktor trenja kroz dlijeto, [-]
- F_a faktor trenja kroz prstenasti prostor, [-]
- ρ_d gustoća fluida u bušaćim šipkama. [kg/m^3]

Tlak na dno, tijekom cirkulacije, u konvencionalnom bušenju predstavlja zbroj hidrostatskog tlaka, P_h i pada tlaka zbog trenja P_f.

$$P_{din} = P_h + P_f \tag{3-10}$$

Kada se pumpe isključe, pad tlaka zbog trenja pada na nulu pa je tlak na dno u statičkim uvjetima.

$$P_{stat} = P_h \tag{3-11}$$

U metodi dvojnih gradijenata i uvjetima kontroliranog tlaka, tlak na dno je određen kako slijedi.

Za bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka:

$$P_{din} = P_h + P_f + B_p \tag{3-12}$$

$$P_{stat} = P_h + B_p \tag{3-13}$$

gdje je B_p protutlak koji ostvaruju pumpe (engl. *backpressure pumps*).

Za metodu dvojnih gradijenata:

$$P_{din} = P_{h,ukupno} + P_f \tag{3-14}$$

$$P_{stat} = P_{h,ukupno} \tag{3-15}$$

gdje je

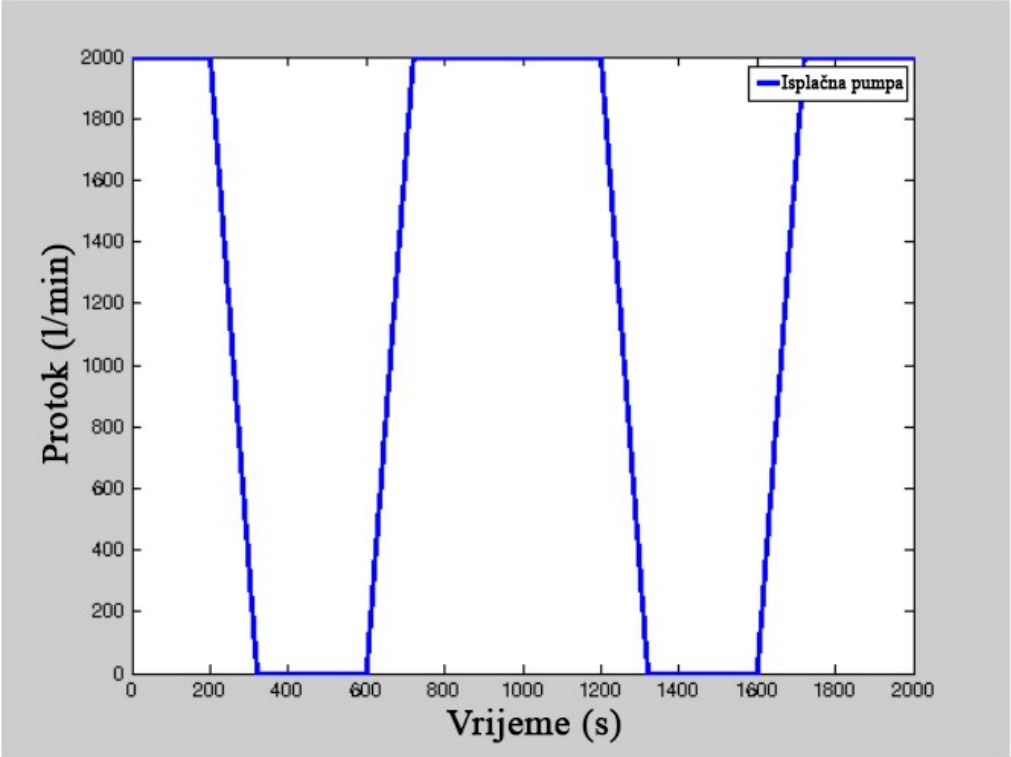
$$P_{h,ukupno} = P_{h,fluid\,1} + P_{h,fluid\,2} \tag{3-16}$$

Hidraulički model koji je modificiran za bušenje uz dvojni gradijent tlaka, umjesto sapnice (engl. *choke valve*) koja se koristi kod bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka za ostvarivanje protutlaka, koristi promjenu razine fluida u rajzer cijevi. Kontrolni algoritmi su slični kao pri kontroliranju tlaka na dno bušotine kod metode bušenja u uvjetima kontroliranog taka. Pri modifikaciji Kaasa modela radi primjene u metodi bušenja uz dvojni gradijent tlaka, dinamika protoka kroz dijeto modificirana je dodavanjem parametra p_{rb}, koji je dan izrazom (Nygaard i Godhavn, 2013):

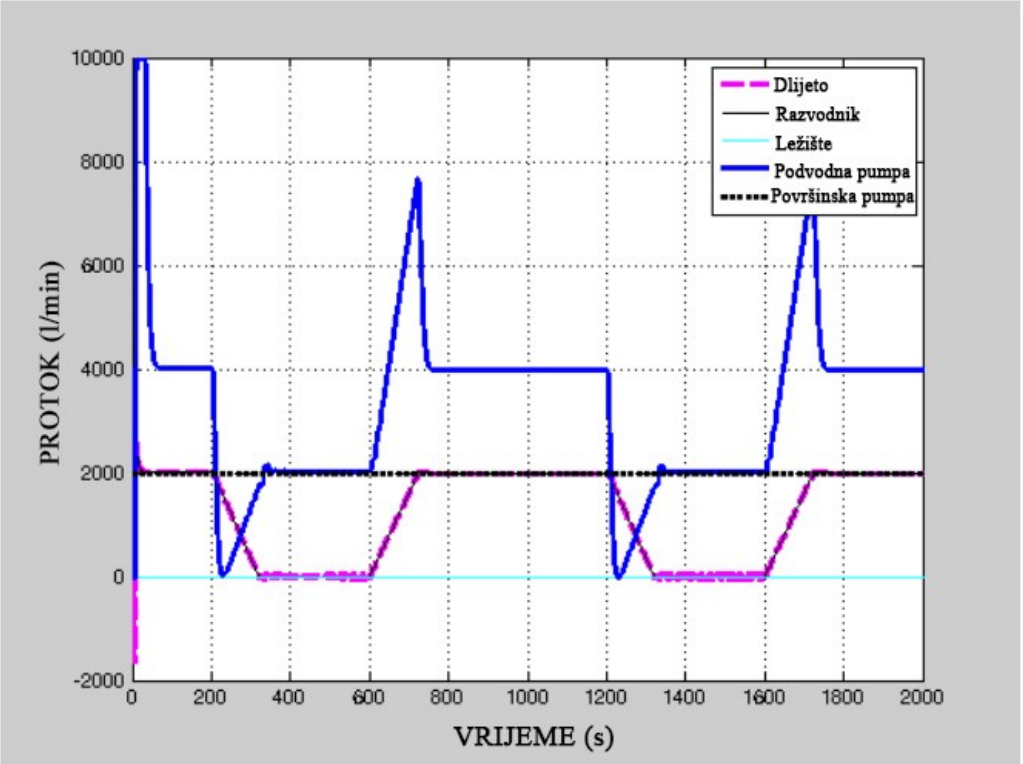
$$\dot{q_b} = \frac{1}{M}\Big(P_p(P_c + P_{rb})\Big) - (F_d + F_b + F_a)q_b^2 + (\rho_d - \rho_a)gh \tag{3-17}$$

U nastavku slijedi primjer simulacije održavanja konstantnog tlaka na dno pri bušenju uz dvojni gradijent tlaka. Metoda dvojnih gradijenata tlaka u ovim simulacijama bazirana je na sustavu kontrole razine isplake, gdje se pumpa za ispunjavanje rajzer cijevi/površinska pumpa (engl. *topfill pump*), zajedno s povodnom pumpom, koristi kako bi se povećala razina isplake u rajzer cijevi. PI kontroler se koristi za kontrolu protoka kroz podvodnu pumpu.

Gornji fluid (engl. *topfill fluid*) je manje gustoće od isplake te je u ovoj simulaciji to voda gustoće 1 000 kg/m^3. Protok kroz površinsku pumpu se održava konstantnim na 2 000 l/min. Kako bi se simulirala operacija dodavanja šipki isplačna pumpa smanjuje dobavu s 2 000 l/min na nulu u roku od dvije minute, počevši od 200 sekundi (slika 3-5). Pri 600 sekundi pumpa vraća dobavu na 2 000 l/min u roku dvije minute. Ista stvar se ponavlja pri 1 200 sekundi.

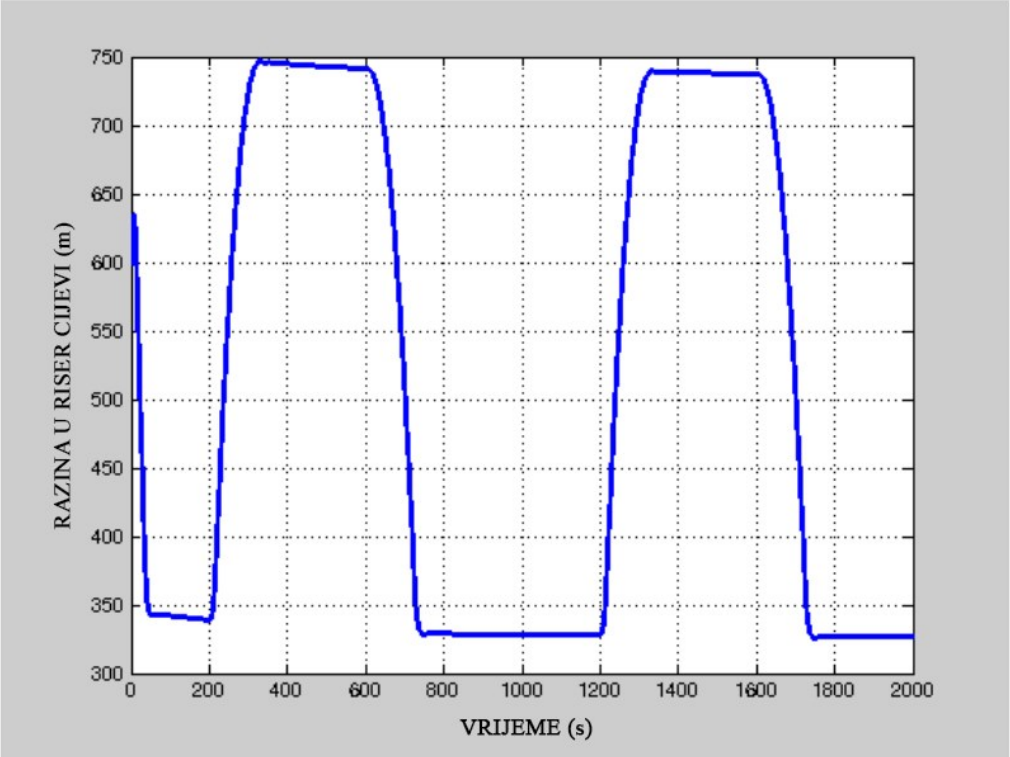


Slika 3-5. Simuliranje operacije dodavanja šipki (Time, 2014).



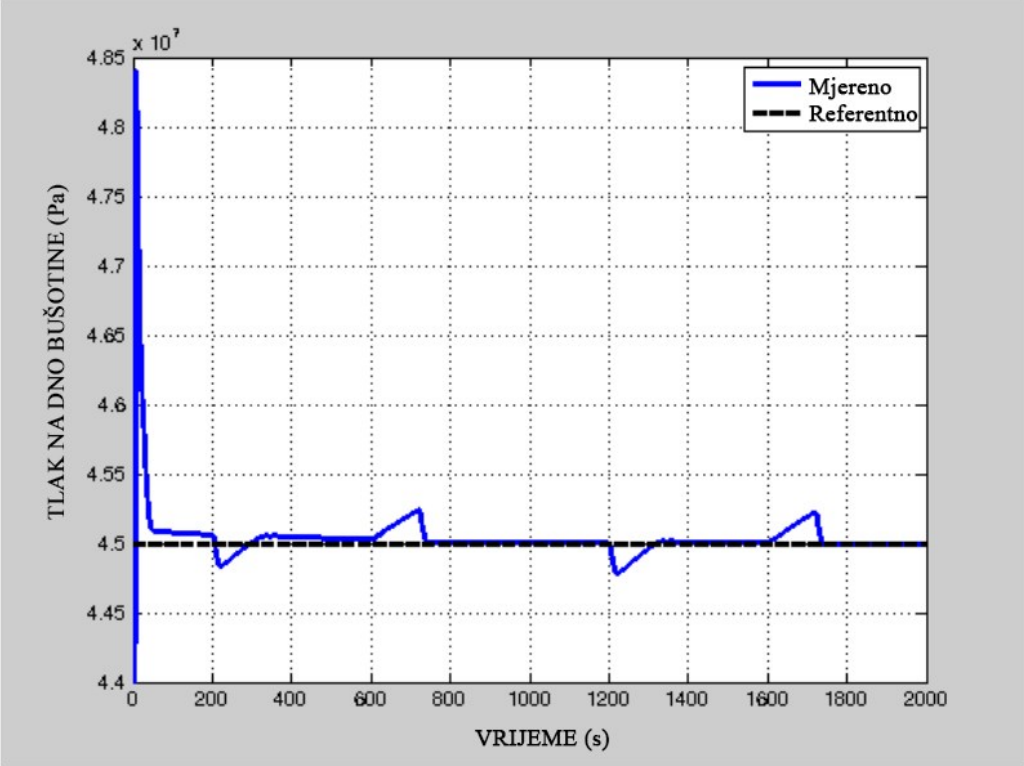
Slika 3-6. Protoci kroz različite dijelove sustava (Time, 2014).

Slika 3-6 prikazuje protoke kroz različite dijelove sustava. U trenutku kad započne simulacija, podvodna pumpa, kontrolirana PI kontrolerom, povećava dobavu do maksimuma od 10 000 l/min kako bi smanjila razinu isplake u rajzer cijevi od početnih 600 metara. Na taj način tlak na dno se smanjuje. Kada on dođe do svoje referentne vrijednosti od 450 bara, podvodna pumpa se stabilizira na 4 000 l/min, što je suma protoka isplačne pumpe i površinske pumpe. Tada je protok u bušotinu jednak protoku iz bušotine, a razina u rajzer cijevi se drži relativno stabilnom oko 340 metara iznad podvodnih pumpi kao što je prikazano na slici 3-7.



Slika 3-7. Razina fluida u rajzer cijevi (Time, 2014).

Na 200 sekundi, kada počinje smanjenje broja hodova pumpe, protok podvodne pumpe se smanjuje na nulu. To omogućava povećanje razine isplake u rajzer cijevi, kako bi se kompenzirao pad tlaka u sustavu te dopušta da tlak na dno ostane na 450 bara. Kako se protok isplačne pumpe smanjuje prema nuli, protok kroz podvodnu pumpu se povećava. Kada se isplačna pumpa isključi nakon 320 sekundi, podvodna pumpa je na 2 000 l/min, jednak iznos koji površinska pumpa utiskuje u rajzer cijevi, kako bi se razina držala neposredno ispod 750 metara. Broj hodova podvodne pumpe se podiže s početkom rada isplačne pumpe nakon dodavanja šipke. To snižava razinu u rajzer cijevi nazad na oko 330 metara, a tlak na dno je još uvijek 450 bara. Kao što se vidi na slici 3-8, PI kontroler upravlja podvodnom pumpom čime se postiže referentna vrijednost za manje od 50 sekundi. Ovo je upola vremena nego što je potrebno kod metode bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka, gdje se referentni tlak dostiže za oko 100 sekundi (Time, 2014). Također efekti naglog nadtlaka i podtlaka, koristeći metodu dvojnih gradijenata, su nešto veći u usporedbi sa simulacijom bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka s aktivnim kontorlerom razvodnika. To ukazuje kako metoda bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka brže reagira na promjene od metode dvojnih gradijenata. Međutim tlak na dno je unutar prihvatljivih industrijskih standarda tijekom dodavanja +/- 2,5 bar (Time, 2014).



Slika 3-8. Usporedba referentne i mjerene vrijednosti tlaka na dno (Time, 2014).

3.2. Povijest i prethodno provedena istraživanja (bušenje uz dvojni gradijent tlaka)

Metoda dvojnih gradijenata javila se početkom ranih 1960-ih (Smith et al., 2001). Prvi relevantni patent je podnio Howell et al. 1976. godine, nakon njega još vrijedni spomena su Arnold 1977., Baynet 1980., i Leach 1987. godine (Stave, 2014). Cilj razvijanja ove nove metode bio je pokušaj nekorištenja rajzer cijevi, od kuda potječe naziv bušenje bez rajzer cijevi (engl. *riserless drilling*, RD). No, zbog tehnoloških ograničenja tog doba, daljnji razvoj je bio zaustavljen. Ponovni pokušaji „oživljavanja“ ove metode javljaju se u naftno-plinskoj industriji 1990-ih kada su započeti udruženi industrijski projekti kako bi se razvila metoda dvojnih gradijenata. Potreba za razvijanjem sustava koji će omogućiti bušenje u dubokom moru se povećavala zbog sve većeg broja otkrića, posebice u dubokom moru Meksičkog zaljeva (engl. *Gulf of Mexico*, GoM). Metoda dvojnih gradijenata je odgovor na većinu problema s kojima se suočavala industrija, budući da je metoda dopuštala smanjenje težine rajzer cijevi i zahtijeva za održavanjem sustava, također i smanjenje volumena isplake, te tako omogućila korištenje manjih platformi koje se prije nisu mogle koristiti u dubokim vodama.

Početkom 1996. godine, na radionici kompanija Conoco i Hydril koncept dvojnih gradijenata tlaka je predstavljen potencijalnim izvođačima, operatorima i servisnim kompanijama, radi procjene potencijala ove nove metode. Radionica je rezultirala ostvarivanjem jednog od najznačajnijih zajedničkih projekata današnjice JIP (engl. *Joint Industry Project*). „Riserless Drilling JIP“ danas je poznat pod nazivom „SubSea Mudlift Drilling JIP (SMD JIP)“, a glavni cilj mu je približavanje metode dvojnih gradijenata tlaka komercijalnoj uporabi. Iste godine pokrenuta su još tri dodatna projekta u svrhu naglaska važnosti ove nove tehnologije, a to su „Shell Oil Co.'s projekt“, „Deep Vision projekt“ i „Maurer Technology's Hollow Glass Spheres projekt“ (Schubert et al., 2006).

Godine 2001. prva terenska primjena metode dvojnih gradijenata tlaka bila je u Meksičkom Zaljevu na bloku Green Canyon 136, kao „Shasta prospect“ kompanije Texaco. U sklopu SMD JIP projekta je uspješno izbušena prva probna bušotina korištenjem poluuronjive platforme „New Era“ tvrtke Diamond u Meksičkom zaljevu, na dubini mora od 277 metara. Unatoč dokazanoj uspješnosti metode bušenja uz dvojni gradijent tlaka u podmorskim uvjetima, bila su potrebna daljnja istraživanja zbog manjih problema s instrumentima i nepredvidivosti tadašnje tehnologije (Smith et al., 2001) te ekonomske neisplativosti što je dovelo do ponovnog prekida u primjeni ove metode (Schumacher et al., 2001).

Kompanija Chevron istražila je opcije za dubokomorsko bušenje koje su uključivale poboljšane sigurnosne mjere, predvidljivost i ekonomsku isplativost. 2009. godine ostvareno je partnerstvo s kompanijom AGR SubSea, globalnim kvalitetnim davateljem usluga bušenja početnih sekcija uz primjenu metode dvojnih gradijenata, koji je imao ulogu dizajniranja, proizvodnje i ovjere testova (Dowell, 2010). Nadalje, kompanija Chevron je naručila izgradnju platforme za bušenje uz primjenu tehnologije dvojnih gradijenata tlaka kako bi povećala učinkovitost, te je za taj posao odabrana kompanija Pacific Drilling. Bušaći brod s dva tornja pod imenom „Pacific Santa Ana“ izgrađen je u Koreji, a radna dubina mora u kojoj može raditi je oko 3 600 m, s mogućom dubinom bušenja od oko 10 500 m. U 2013. godini brod je u Meksičkom zaljevu izbušio tri bušotine. Prve dvije bušotine na konvencionalan način, te je potom započeo prvu svjetsku bušotinu izbušenu uz primjenu komercijalne metode dvojnih gradijenata, bušenje uz primjenu podvodnog podizanja isplake (SMD). Taj događaj je bio prekretnica, koja je potaknula industriju da ponovo procijeni većinu najčešće korištenih bušaćih tehnologija (Dowell, 2010).

Kompanija Ocean Riser predložila je primjenu metode povrata isplake s dna rajzer cijevi (engl. *low riser return system*, LRRS). Kao važni dodatak metodi dvojnih gradijenata, imao

je velike sličnosti s AGR-ovim sustavom kontrolirane razine isplake u prstenastom prostoru (engl. *controlled annular mud level*). Obje metode imaju mogućnost reguliranja razine isplake u rajzer cijevima te transportiranje povratnog toka isplake iz bušotine s podvodim pumpama kroz cijev za povrat isplake do površine. Nakon spajanja Ocean Riser kompanije s kompanijom AGR, 2013. godine predstavljena je najnovija metoda dvojnih gradijenata zvana EC-Drill. Njezina primjena u Meksičkom zaljevu smatra se prvom uspješnom komercijalnom primjenom takve metode. Kompanija AGR Enhanced Solutions je postavila opremu za bušenje uz dvojni gradijent tlaka na Saipemovu poluuronjivu platformu, Scarabeo-9 MODU (Ziegler et al., 2013; Malt i Stave, 2014).

Kompanija AGR je razvila još jednu primjenjivu metodu bušenja uz dvojni gradijent tlaka pod nazivom povrat isplake bez rajzer cijevi (engl. *riserless mud recovery*, RMR), a koja je prvi put primijenjena 2010. godine za bušenje uvodnog kanala promjera 0,66 m u bušotini MC540 Krakatoa u Mississippi Canyon bloku Meksičkog zaljeva. Metoda povrata isplake bez rajzer cijevi se primarno koristi za bušenje početnih sekcija (bušenje za ugradnju uvodne kolone).

3.2.1. Kratki pregled najvažnijih udruženih projekata

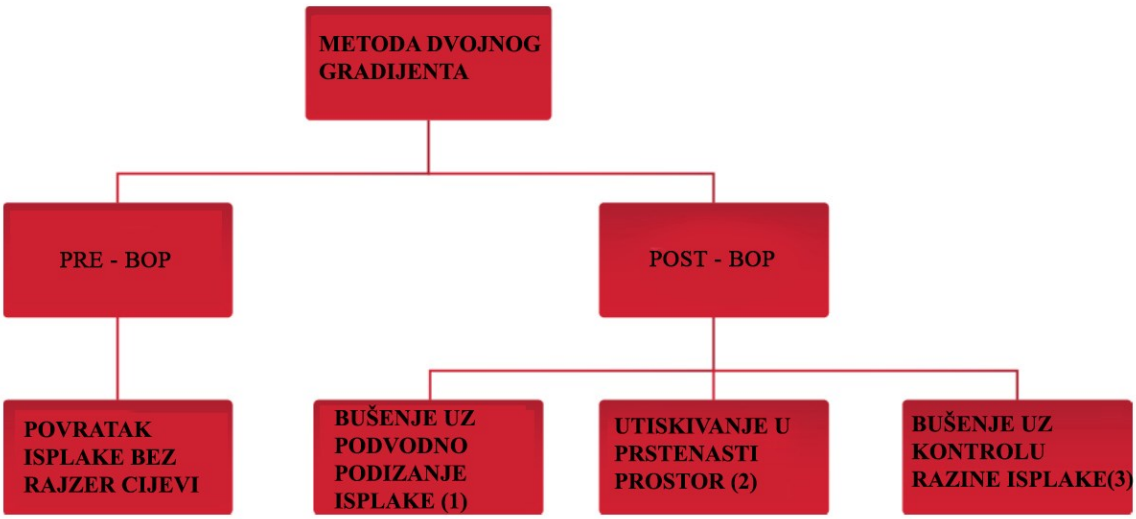
Razvoj metode dvojnih gradijenta je tekao na sljedeći način (Stave, 2014):

- U okviru projekta „The SubSea MudLift Drilling“, kojeg su vodile kompanije Conoco i Haydril uz pridružene druge operatore i servisne kompanije, razvijena je „klasična“ metoda bušenja uz dvojni gradijent tlaka s rajzer cijevi ispunjenom morskom vodom i podvodnim pumpama na morskom dnu.
- Kompanije BakerHughes i Transocean, u partnerstvu s kompanijom BP (British Petroleum) vodile su projekt „The DeepVision“ te se udruženim radom njihovih stručnjaka razvijala klasična metoda bušenja uz dvojni gradijent tlaka, no s fokusom na bušenje sa savitljivim tubingom.
- Kompanija Shell SSPS razvija još jednu varijaciju na klasičnu metodu dvojnih gradijenata, ali s podvodnom separacijom krhotina.
- Kompanija Marurer Engineering je razvila metodu „Dilution method“ utiskivanja šupljih staklenih kuglica u prstenasti prostor kako bi se „olakšao“ stupac isplake tj. smanjio hidrostatski tlak stupca isplake unutar rajzer cijevi.

- U Norveškoj (1997. do 1998.) nekoliko operatora (Statoil, Norsk Hydro, Saga Petroleum, Agip) u suradnji s PGS-om (Sangesland, et al.) su radili na konceptu kontrolirane razine isplake unutar rajzer cijevi (engl. *controlled mud level*).

4. Podjela metoda bušenja uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka

Postoji više podjela metoda bušenja uz dvojni gradijent tlaka. Tako se komercijalne metode dvojnih gradijenata mogu svrstavati u dvije kategorije: prije i nakon ugradnje podvodnog preventerskog sklopa (BOP) (slika 4-1). Kategorija „Pre-BOP“ podrazumijeva proces početnog bušenja koje se odvija prije postavljanja podvodnog preventera, a u nju spada metoda bušenja s povratom isplake bez rajzer cijevi. „Post-BOP“ kategorija podrazumijeva sve procese bušenja koji se odvijaju nakon postavljanja podvodnog preventera (Claudey i Maubach, 2016). U nju spadaju metoda bušenja uz primjenu podvodnih pumpi za podizanje isplake s rajzer cijevi ispunjenom morskom vodom (1), smanjenje hidrostatskog stupca isplake dodavanjem plina ili materijala male gustoće (2) te metoda kontrole visine fluida unutar rajzer cijevi zbog održavanja željenog tlaka na dno (3).



Slika 4-1. Podjela metoda dvojnog gradijenta (Time, 2014).

Metode dvojnih gradijenata koje će se obrađivati u ovom radu su:

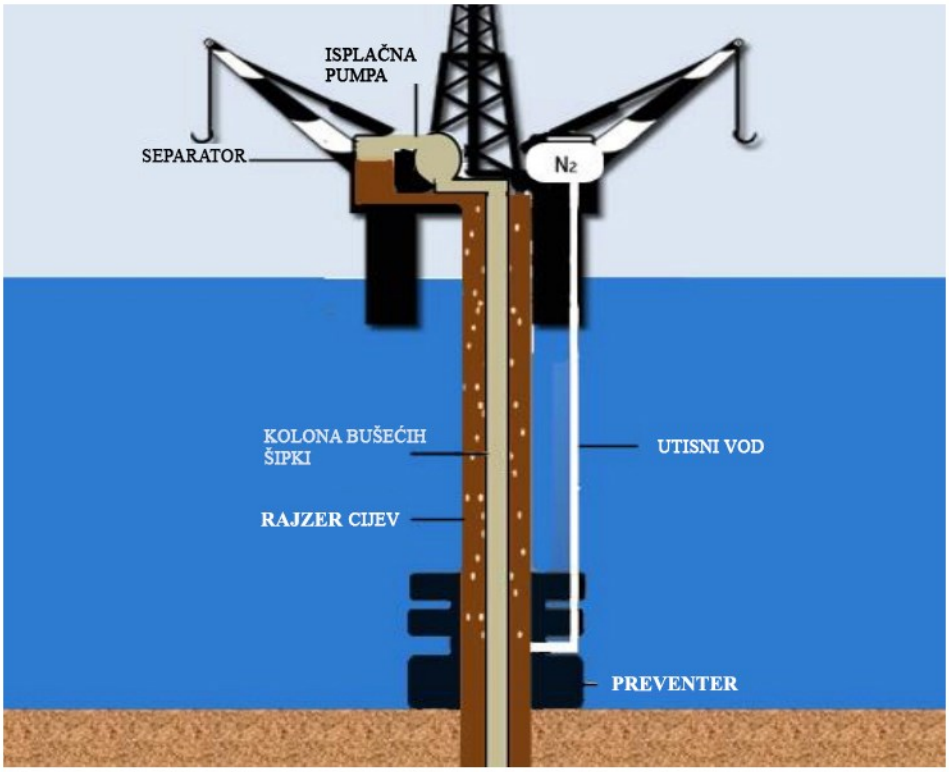
- Metode dvojnih gradijenata temeljene na utiskivanju u prstenasti prostor.
- Metode dvojnih gradijenata temeljene na korištenju pumpi.

4.1. Metode dvojnih gradijenata temeljene na utiskivanju u prstenasti prostor

Princip rada ovih metoda je utiskivanje plina ili šupljih staklenih mikrokuglica u prstenasti prostor, kako bi se olakšao stupac isplake u rajzer cijevima odnosno stvorio dvojni gradijent tlaka unutar bušotine.

4.1.1. Smanjenje gustoće isplake utiskivanjem plina

Plin, najčešće dušik se utiskuje u rajzer cijev iznad morskog dna kako bi se smanjio hidrostatski tlak stupca isplake. Plin se utiskuje kod podvodnog preventera (BOP) kroz cijev koja dolazi s platforme, potom se miješa s isplakom te se u separatorima na postrojenju izdvaja iz povratnog toka isplake (slika 4-2). Ova metoda je nalik plinskom podizanju kod procesa proizvodnje nafte i plina (Herrmann, et al., 2001).



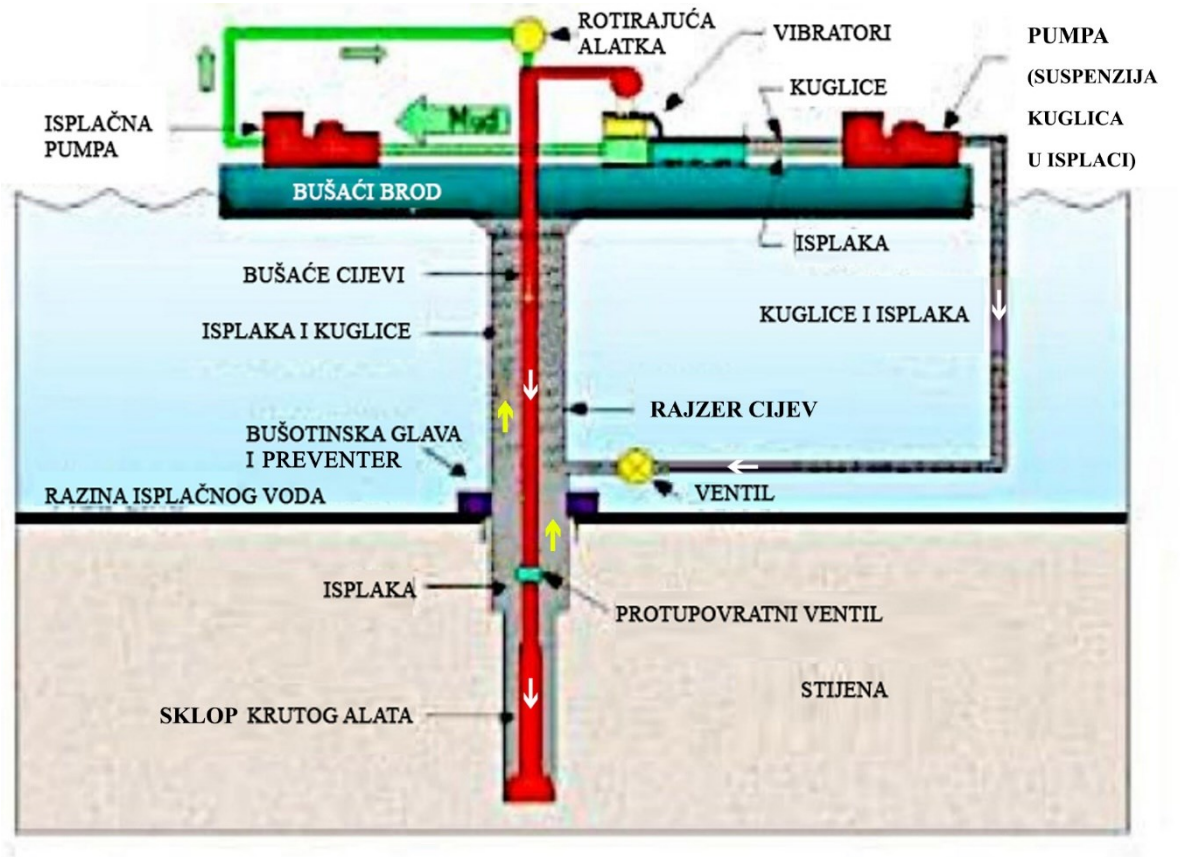
Slika 4-2. Metoda smanjenja hidrostatskog tlaka utiskivanjem plina (Herrmann, et al., 2001).

4.1.2. Smanjenje gustoće isplake dodavanjem šupljih staklenih mikrokuglica

Materijal koji se koristi radi olakšavanja stupca isplake su šuplje staklene mikrokuglice, koje je razvila kompanija Maurer Engineering. Kemijski su inertne i nestlačive. Nakon miješanja s isplakom na površini pumpaju se do morskog dna kao kaša te se, kao kod

prethode metode, utiskuju u rajzer cijev (slika 4-3) (Halkyard et al., 2014). Nedostaci šupljih staklenih mikrokuglica su:

- relativno visoka cijena materijala,
- za ekonomsku isplativost sve mikrokuglice trebaju biti vraćene na površinu i ponovno upotrijebljene, a lom kuglica treba biti sveden na minimum,
- nepoznat utjecaj na okoliš u slučaju njihovog ispuštanja.



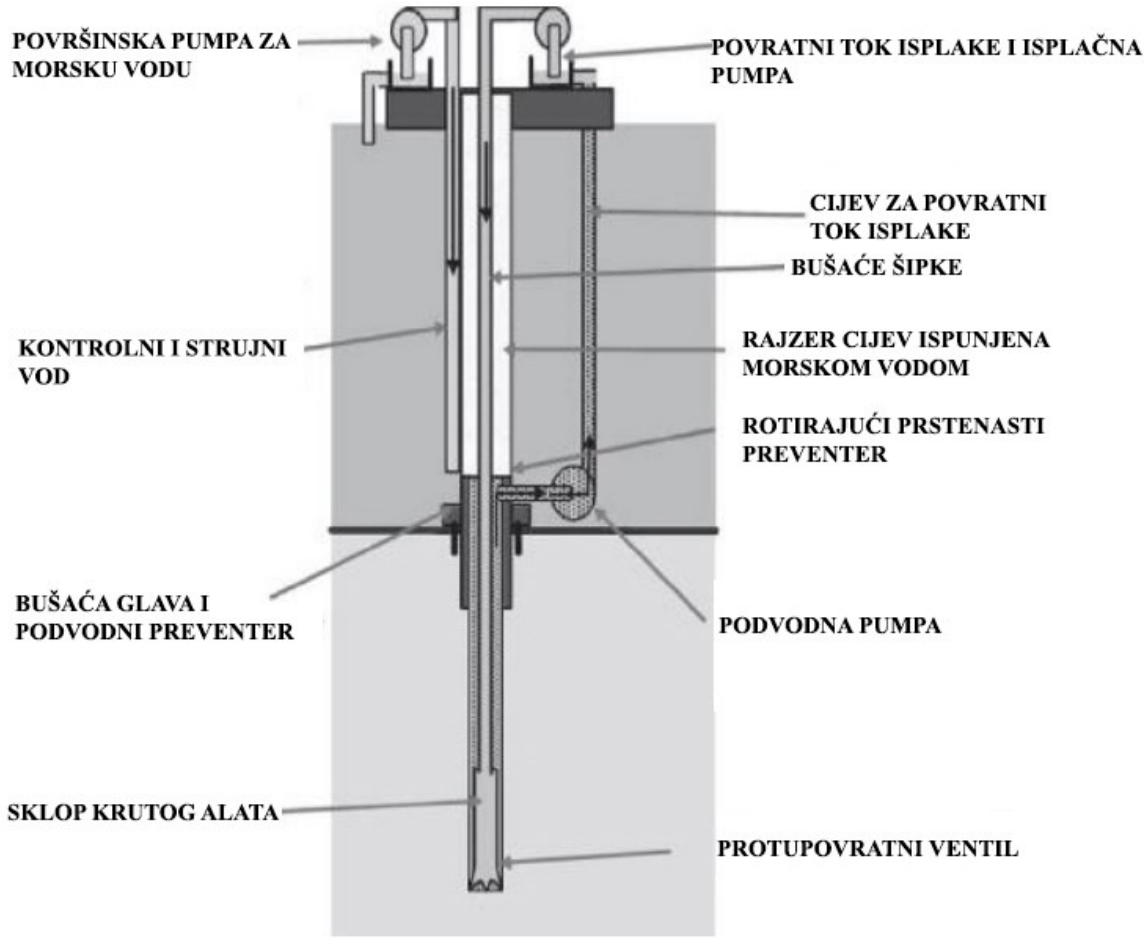
Slika 4-3. Metoda smanjenja hidrostatskog tlaka utiskivanjem suspenzije staklenih mikrokuglica u isplaci (Halkyard et al., 2014).

4.2. Metode dvojnih gradijenata temeljene na korištenju podvodnih pumpi za podizanje fluida

Glavni princip ovih metoda je smanjenje ili uklanjanje stupca isplake iz rajzer cijevi. Podvodnim pumpama (engl. *subsea mudlift pumps*, SMP) transportiraju se isplaka i krhotine stijena od bušotinske glave do površine kroz zasebnu cijev, što uzrokuje efekt dvojnog tlaka u bušotini.

4.2.1. Metoda bušenja uz primjenu podvodne pumpe za podizanje isplake

Metoda bušenja uz primjenu podvodne pumpe za podizanje isplake (engl. *subsea mudlift drilling system*, SMD) je prvi put predstavljena 2001. godine kao rezultat JIP projekta „Subsea mudlift drilling“ započetog 1996. godine (Schubert et al., 2006). Kod ove metode podvodna isplačna pumpa postavlja se na morsko dno odnosno na razinu isplačnog voda (engl. *mudline level*), a morska voda se pumpa s površine u rajzer cijev, tako ispunjavajući prostor iznad ušća bušotine. Podvodne pumpe stvaraju ulazni tlak transportirajući povratni tok isplake iz bušotine nazad do površine platforme kroz povratnu cijev nakon što krhotine prođu kroz podvodnu procesnu jedinicu. Ulazni tlak jednak je tlaku morske vode točno ispod rotirajućeg preventera. Isplaka koja se pumpa u bušotinu ostvaruje tlak na dno bušotine, a rotirajući prstenasti preventer brtvi prostor između bušotine i rajzer cijevi te tako stvara zatvoreni sustav u kojem je lakše kontrolirati tlak unutar bušotine. Na slika 4-4 prikazan je sustav koji je predložio J.J Schubert (2006).



Slika 4-4. Metoda bušenja uz primjenu podvodne pumpe za podizanje isplake (Schubert et al., 2006).

U jednadžbi koja opisuje tlak na dno u metodi bušenja uz primjenu podvodne pumpe za podizanje isplake, h_{mv} predstavlja visinu vode u rajzer cijevi, a ρ_{mv} je gustoća morske vode (1 030 kg/m^3). Jednadžba koja opisuje tlak (Dowell, 2010):

$$p = (h_{mv}9{,}80665\rho_{mv}) + (TVD - h_{mv})9{,}80665\rho_i \tag{4-1}$$

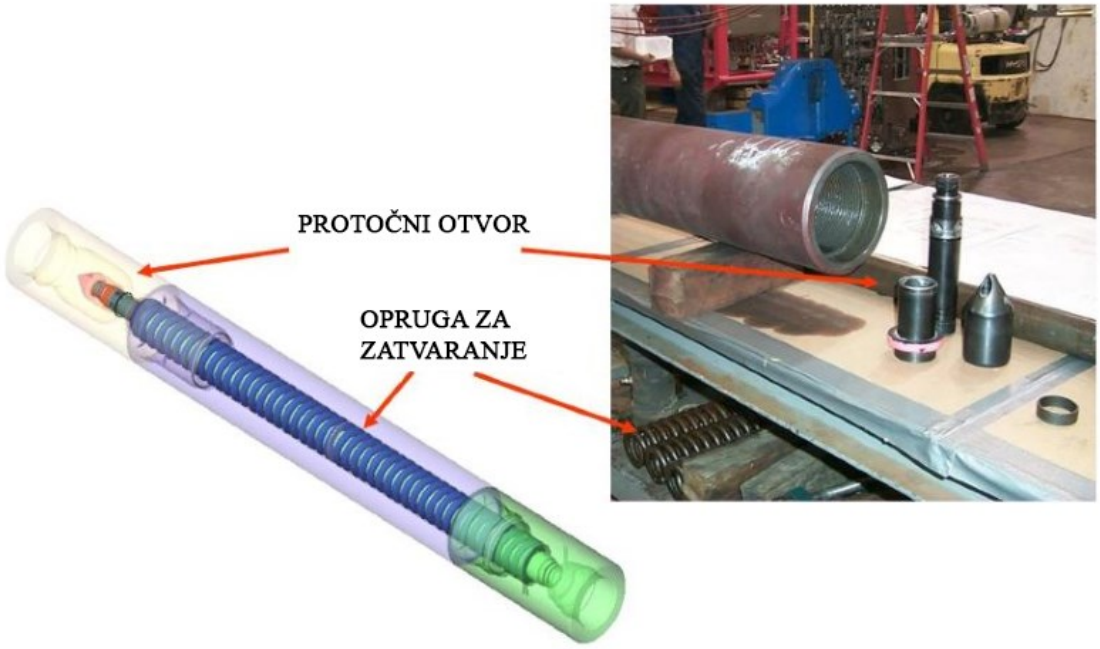
Jednadžba za relativnu gustoću isplake (Dowell, 2010):

$$\gamma_r = \frac{(h_{mv}\rho_{mv})}{TVD} + \left(\rho_i - \frac{h_{mv}\rho_i}{TVD}\right) \tag{4-2}$$

Metoda bušenja uz primjenu podvodne pumpe za podizanje isplake ovisi samo o upravljanju gustoćom isplake ρ_i kako bi se postigao željeni tlak na dno bušotine, bez mijenjanja drugih parametara.

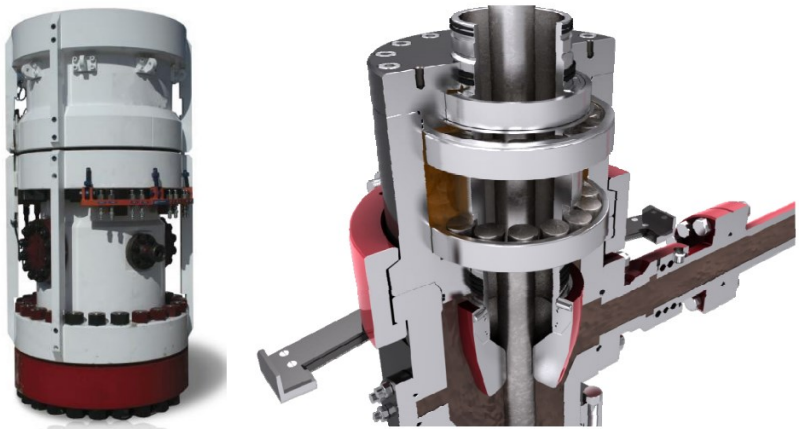
Oprema metode bušenja uz primjenu podvodne pumpe za podizanje isplake je prilagođena radu na dubinama mora većim od 3 000 metara te se ne može naći na postojećim postrojenjima odnosno platformama za dubokomorsko bušenje. Opremu čine protupovratni ventil, povodni rotirajući preventer, podvodna pumpa, procesna jedinica za krhotine i otpusna rajzer spojnica.

Protupovratni ventil za bušaće šipke (engl. *drill string valve*, DSV) montira se unutar kolone bušaćih šipki, a sprječava pojavu neželjenog efekta U-cijevi, tlačnu ravnotežu u statičkim uvjetima te omogućava poboljšano otkrivanje utoka, sigurnije operacije dodavanja i vađenja alatki (slika 4-5). Ako protupovratni ventil propušta, stvara se vakuum na ulazu promjera 0,0508 m (2“) montiranom na razvodniku stojke smještenom na nazuvici ispirne glave (engl. *gooseneck*). Protupovratni ventil se proizvodi u različitim veličinama, a obično se postavlja iznad sklopa krutog alata (engl. *bottom hole assembly,* BHA).



Slika 4-5. Protupovratni ventil za bušaće šipke (Dowell, 2010).

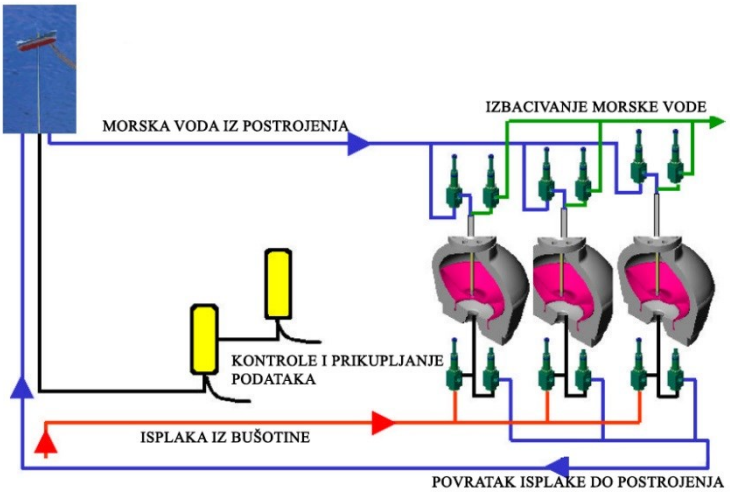
Primarna funkcija povodnog rotirajućeg preventera (engl. *subsea rotating device*, SRD) (slika 4-6) kao mehaničke pregrade jest odvajanje fluida manje gustoće (morske vode) te veće gustoće (isplake). Iako je povodni rotirajući preventer napravljen da radi pri vrlo malom diferencijalnom tlaku, on može izdržati i veće i manje tlakove (do 69 bar, 1000 psi). Preventer se montira 18 metara iznad podvodne pumpe (Dowell, 2010).



Slika 4-6. Povodni rotirajući preventer (Dowell, 2010; Saeed et al., 2012).

Podvodna pumpa (engl. *mudlift pump*, MLP) predstavlja najvažniji dio metode bušenja uz primjenu podvodne pumpe za podizanje isplake budući da je ključna za uspostavljanje dvojnog gradijenta. Osim što pumpa osigurava da hidrostatski tlak povratnog toka isplake ne narušava tlačni profil/gradijent tlaka u bušotini, također podiže povratni tok isplake kroz povratnu cijev do površine platforme. Pumpa se sastoji od šest cilindara (zapremnine 0,3 m^3)

te radi na principu dijafragme, pogoni ju hidraulički sustav morske vode (slika 4-7), inovativno rješenje koje pošteđuje operatora posla dovoda električnih kablova do morskog dna. Pumpa je potisnog tipa sa samostalno kontroliranim usisnim i ispusnim ventilima. Pošto je svaki cilindar neovisan, pumpa se može koristiti kao dvije tripleks pumpe, kvintapleks, kvadripleks, tripleks, dupleks ili jednocilindrična pumpa (Dowell, 2010).



Slika 4-7. Shema pogona pumpe za podizanje isplake morskom vodom (Smith et al., 2001).

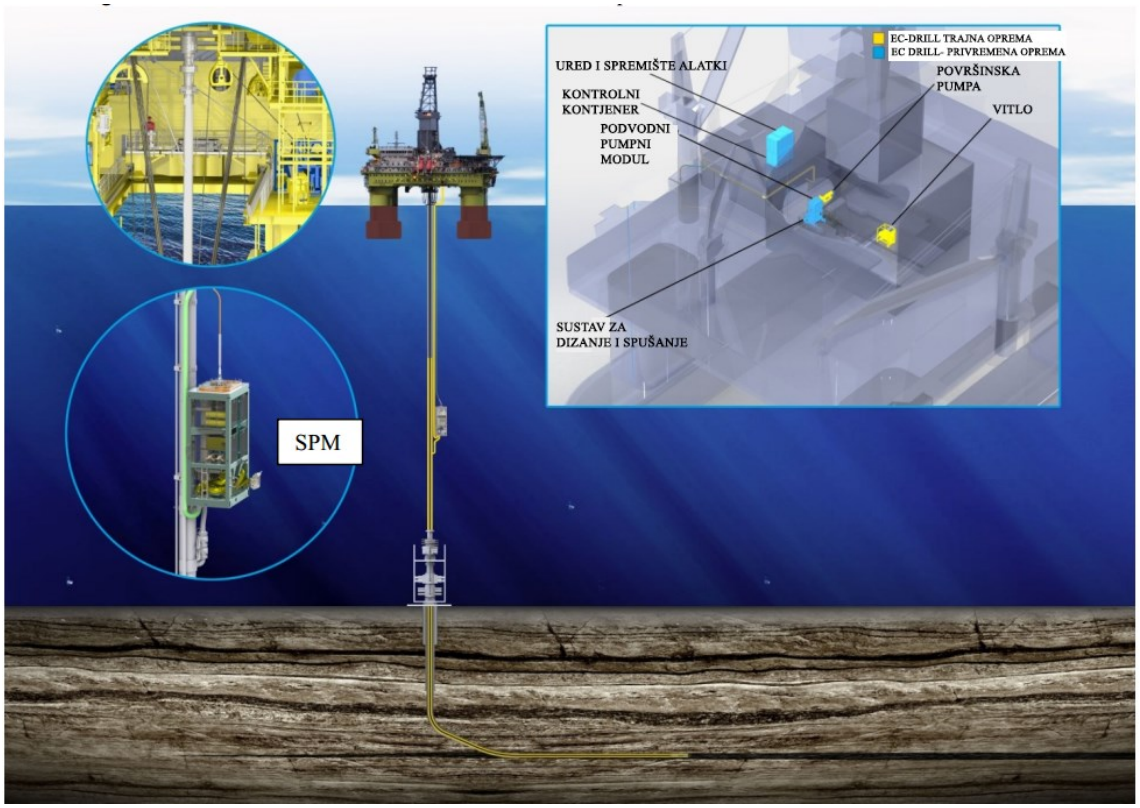
Procesna jedinica za krhotine (engl. *solids processing unit*, SPU) razbija veće krhotine prije njihovog prolaska kroz podvodnu pumpu. Nakon niza provedenih testiranja, dokazana je uspješnost zbrinjavanja materijala poput gume od cementacijskih čepova, krhotina izbušene zaustavne ploče i gline (engl. *gumbo*) (Malt i Stave, 2014).

Rasteretna spojnica MR cijevi (engl. *riser dump joint*, RDJ) je tijekom rada zatvorena, ne dopušta miješanje između fluida unutar i izvan rajzer cijevi. U slučaju opasnosti otvaranjem spojnice omogućuje se odvajanje od podvodnog rotirajućeg preventera te ispuštanje fluida iz rajzer cijevi odnosno smanjenje opterećenje na rajzer sustav.

4.2.2. Metoda bušenja uz primjenu podvodne pumpe i rajzer cijevi ispunjenom fluidom

Nova metoda kontrole razine isplake u prstenastom prostoru (engl. *controlled annular mud level*, CML) koju je razvila kompanija AGR nazvana je „EC-Drill“ metodom (Stave, 2014). Metoda je slična prethodno opisanoj metodi bušenja uz primjenu podvodne pumpe za podizanje isplake po tome što također koristi podvodnu pumpu i zasebnu cijev za povrat toka do platforme. Razlika između ove dvije metode je što „EC-Drill“ sustav koristi isplaku, a ne morsku vodu u rajzer cijevi. „EC-Drill“ metodom omogućeno je bušenje dubljih sekcija

korištenjem iste isplake bez mijenjanja njezine gustoće tijekom procesa bušenja. Nadalje, ova metoda pruža opciju bušenja u otvorenom ili zatvorenom sustavu, a budući da djeluje kao zaseban sustav koji se montira na rajzer cijev omogućava i bušenje na konvencionalan način. Sustav se lako postavlja na već postojeća postrojenja uz male preinake (Rajabi et al., 2012). Na slici 4-8 su prikazani glavni dijelovi „EC-drill“ metode te njihov razmještaj na platformi.



Slika 4-8. „EC-drill“ metoda (Malt i Stave, 2014).

Pumpom, koja je pričvršćena na rajzer cijev, upravlja se razinom isplake unutar same cijevi. Razinom i gustoćom isplake upravlja s hidrostatskim tlakom u prstenastom prostoru odnosno omogućava se kontrola i podešavanje gradijenta tlaka. Kada se započne proces bušenja, ekvivalentna gustoća isplake se povećava što uzrokuje povećanja tlaka na dno bušotine. Podešavanje razine isplake poništava se efekt ekvivalentne gustoće isplake u cirkulaciji, što uzrokuje stabilan tlak na dno. Primjenom ove metode olakšano je bušenje u uvjetima male razlike između slojnog tlaka i tlaka frakturiranja (bušaće prozore) su olakšani. Metoda ne koristi rotirajući kontrolni uređaj što omogućava olakšano odvajanje rajzer cijevi.

U jednadžbama koje slijede h_z je dužina praznog dijela rajzer cijevi, a ρ_z je gustoća zraka, čija se vrijednost uzima kao 0. Slijedi izraz za tlak na dno (Dowell, 2010):

$$p = (TVD - h_z)9{,}0665\rho_i \tag{4-3}$$

Jednadžba za relativnu gustoću isplake (Dowell, 2010):

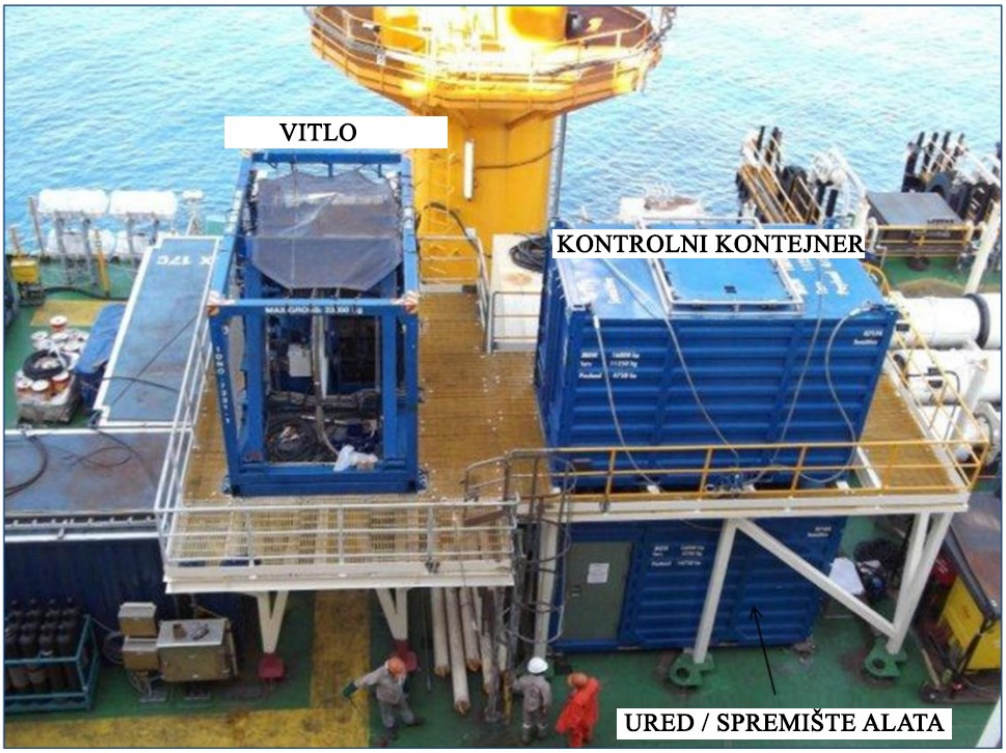
$$\gamma_r = \left(\rho_i - \frac{h_z\rho_i}{TVD}\right) \tag{4-4}$$

Parametri koji se mogu mijenjati su duljina stupca zraka u rajzer cijevi i gustoća isplake kako bi se ostvario željen tlak na dno.

U nastavku će biti navedena oprema koja se koristi na poluuronjivoj platformi kompanije Saipem, a koja se može podijeliti na površinsku i podvodnu. Površinsku opremu čine ured i kontejner za alatke, kontrolni modul ili kontrolni kontejner, kontrolni i nadzorni sustav, vitlo s crijevom te nosač za rukovanje cijevima. Podvodnu opremu čine podvodni pumpni modul, cijev za povratni tok i modificirani zglob rajzer cijevi (Rajabi et al., 2012; Stave, 2014).

Ured i kontejner za alatke (engl. *office/tool container*) sadržava kontrole za upravljanje metodom dvojnih gradijenata i monitore za nadzor, senzore te opremu za spajanje „EC-Drill“ sustava s postrojenjem (Rajabi et al., 2012).

Kontrolni modul ili kontrolni kontejner uskladištenu energiju dovodi podvodnom pumpnom modulu (engl. *subsea pump module*, SPM). Uključuje pogon promjenjive frekvencije (engl. v*ariable frequency drive,*VFD), transformator s mogućnosti povećanja napona s 440 V na 3000 V, filtre za moduliranje te nadzorni sustav. Uz sustave klima uređaja i ventilacijski sustav nalazi se i sustav za detekciju plinova. Slika 4-9 prikazuje razmještaj ureda i kontrolnog kontejnera.



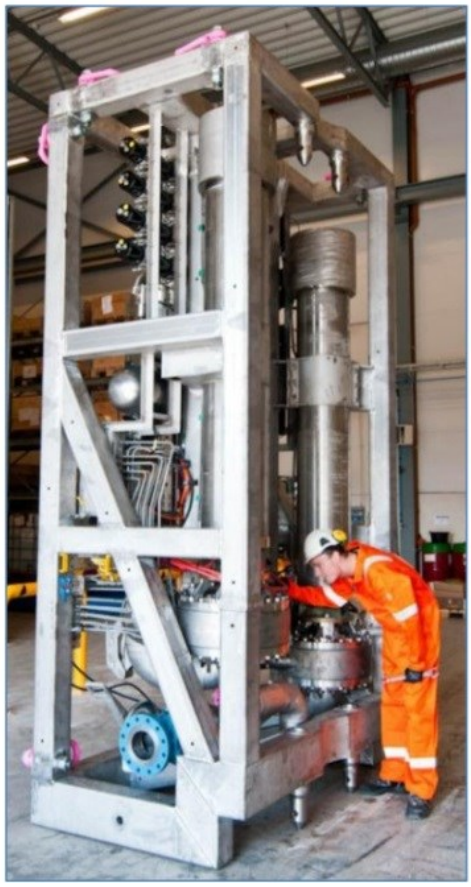
Slika 4-9. Ured i kontrolni kontejner (Rajabi et al., 2012).

Glavna uloga kontrolnog i nadzornog sustava je kontrola podvodnog pumpnog modula i održavanje željenog protoka kroz vod za povratni tok isplake te odabrane razine fluida u rajzer cijevi. Željena razina u rajzer cijevi se održava podešavanjem pogona za promjenu frekvencije koji mijenja brzinu hoda podvodnih pumpi.

Vitlo s crijevom služi za prijenos električne energije i signala do podvodnog pumpnog modula.

Nosač za rukovanje cijevima (engl. *hose handling platform*, HHP) omogućava sigurno i lagano spuštanje cijevi za povratni tok isplake (engl. *mud return line*, MRL). Zadnja cijev trajno se privezuje na vješalicu koja se nalazi na nosaču.

Podvodni pumpni modul se postavlja na rajzer cijev, a sadrži podvodnu pumpu s pripadajućim cijevima, podvodni kontrolni modul te potrebne ventile i senzore (slika 4-10).



Slika 4-10. Podvodni pumpni modul (Rajabi et al., 2012).

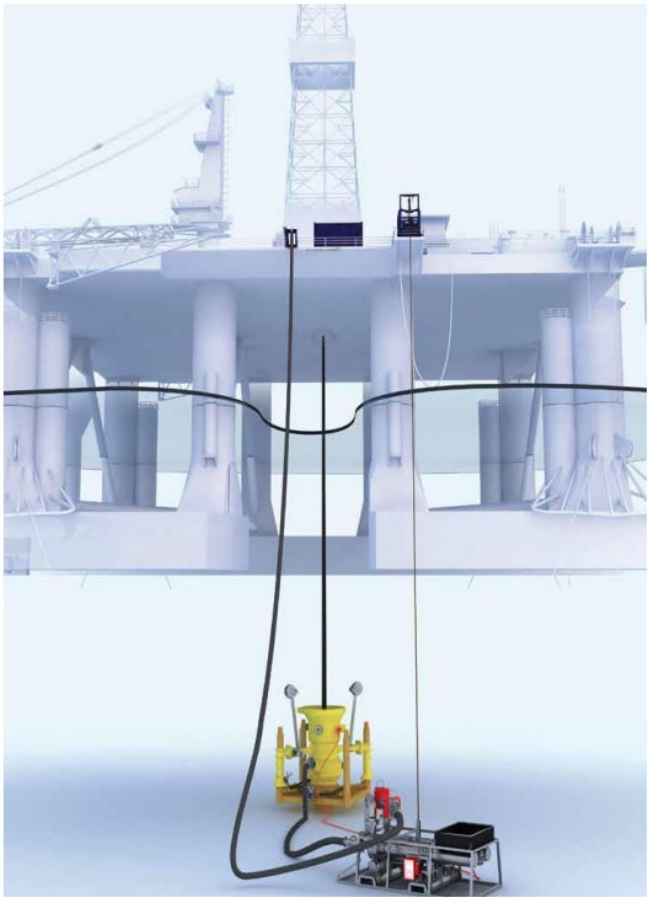
Cijev za povratni tok isplake (MRL) je fleksibilno crijevo koje služi kao vod za transport isplake i krhotina iz bušotine do površine.

Modificirani zglob rajzer cijevi (engl. *modified riser joint*) služi kao sidrišno mjesto za rajzer cijev, a sadrži ventile i senzore. Njime upravlja kontrolni sustav putem podvodnog pumpnog modula.

4.2.3. Metoda povrata isplake bez rajzer cijevi

Metoda povrata isplake bez rajzer cijevi (engl. *riserless mud recovery*, RMR) razvijena od strane kompanije AGR-a namijenjena je za početno bušenje odnosno bušenje početnih sekcija na većim dubinama uz uporabu otežane inhibirane isplake. Sam koncept metode povrata isplake bez rajzer cijevi je prikazan na slici 4-11. Uz korištenje podvodnih pumpi i transportnog sustava kao kod prethodne metode, metoda povrata isplake bez rajzer cijevi koristi usisni modul na bušotinskoj glavi (engl. *suction module*, SMO). Usisni modul služi kao ulazna točka koloni bušaćih šipki, a omogućava kontrolu linije dodira između isplake i

morske vode, koju je važno pratiti radi prevencije izljeva isplake u morski okoliš. Detaljniji opis ove metode biti će dan u poglavlju 6.2.



Slika 4-11. Metoda povrata isplake bez rajzer cijevi (www.enhanced-drilling.com).

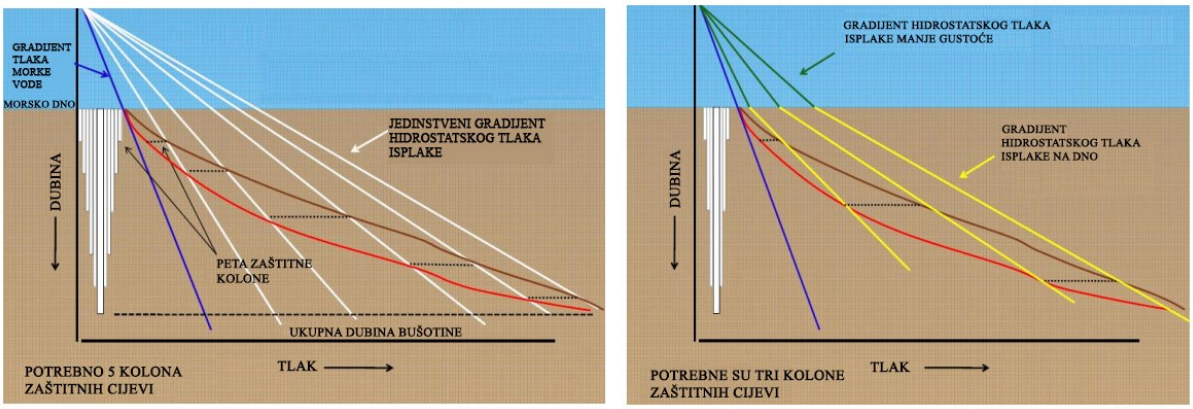
5. Prednosti i nedostaci bušenja uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka

5.1. Prednosti bušenja uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka

Jedna od prednosti bušenja uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka je mogućnost bušenja u dubokomorskim uvjetima odnosno uvjetima visokog tlaka i visoke temperature (engl. *high pressure high temperature*, HPHT), budući da je bušenje uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka posebno razvijeno kako bi se otklonili rizici od dotoka slojnog fluida, gubitka isplake te slučajeva zaglave alata pri malim razlikama između slojnog tlaka i tlaka frakturiranja (uskog bušaćeg prozora).

Kod konvencionalnog bušenja dubokomorskih okoliša, potrebne su dodatne kolone zaštitnih cijevi kako bi se osigurala stabilnost kanala bušotine i ciljana dubina. No, to dovodi do postavljanja proizvodne kolone smanjenog promjera odnosno manje proizvodnje.

Prednost bušenja uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka je upravo potreba za manjim brojem kolona zaštitnih cijevi, što omogućava postavljanje proizvodne kolone većih promjera. Također, manja potreba za ugradnjom zaštitnih cijevi znači manje vremena potrošeno na vađenje i dodavanje bušaćih šipki, manje vremena potrošenog na cementiranje i manje karotažnih mjerenja i ispitivanja. Na slici 5-1 je uspoređen broj potrebnih kolona zaštitnih cijevi kako bi se osigurao strukturni integritet bušotine korištenjem jedinstvenog i dvojnog gradijenta tlaka.



Slika 5-1. Usporedba jedinstvenog (lijevo) i dvojnog gradijenta tlaka (desno) (Gaup, 2012).

Bušenje uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka olakšava održavanje konstantnog tlaka na dno bušotine bez potrebe mijenjanja gustoće isplake, što omogućava dugotrajnije bušenje te smanjeno neproduktivno vrijeme (engl. *non-productive time*, NPT). Tako, primjerice, u ultra dubokim bušotinama često se zna potrošiti manje od trećine vremena na sam proces bušenja. Neproduktivno vrijeme predstavlja sve operacije kod kojih se zaustavlja bušenje, a obuhvaćaju 32% ukupnih troškova operacije bušenja (www.halliburton.com). Bušenje uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka ima potencijal umanjiti troškove za više od 50%.

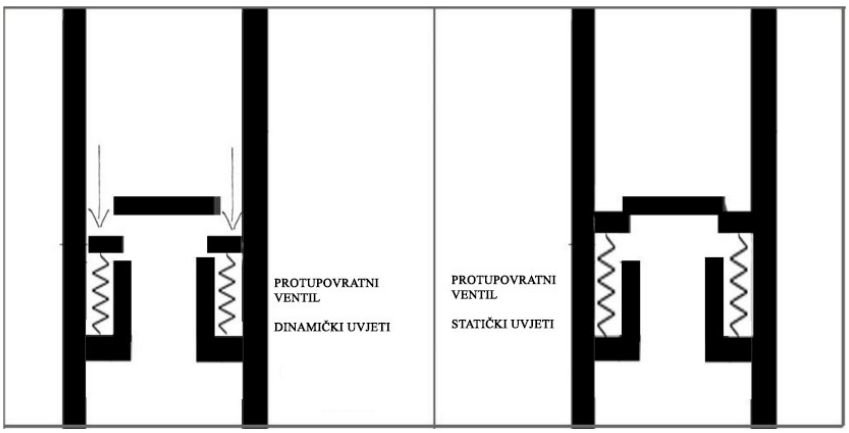
Dotok slojnog fluida primjenom ove metode može se preciznije otkriti primjenom računalnih programa, budući da se povećanje protoka u prstenastom prostoru brzo otkriva jer se povećava protok povratne pumpe.

Jedan od glavnih problema u konvencionalnom bušenju je puknuće rajzer cijevi. U tom slučaju gubi se tlak na dno budući da je hidrostatski tlak stupca isplake ostvarivao tlak na dno bušotine. Kada se buši uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka na bušotinskoj glavi je hidrostatski tlak stupca morske vode. Odvajanje rajzer cijevi neće utjecati na tlak na dno bušotine pošto se ispod bušotinske glave nalazi tlak stupca otežane isplake.

Dakle, glavne prednosti metode bušenja uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka jesu upravo veća ekonomska isplativost procesa bušenja i povećanje ukupne proizvodnje (pogledati poglavlje 2., slika 2-1).

5.2. Nedostaci bušenja uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka

Kao jedan od glavnih nedostataka metode bušenja uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka može se navesti efekt U-cijevi koji nastaje kao posljedica neravnoteže tlakova u sustavu uzrokovane isključivanjem pumpi zbog dodavanja šipki. Ovaj efekt se teško razlikuje od potencijalnog utoka fluida (Schumacher et al., 2001). Stoga, kako bi se spriječio efekt U-cijevi, prilikom primjene metode dvojnog gradijenta tlaka koristi se protupovratni ventil (DSV) (Choe et al., 2007). On služi kako bi podnio tlak stupca isplake u bušaćim šipkama. Dinamički uvjeti tijekom bušenja drže ventil otvorenim, a trenutno se zatvara kada se isključe pumpe (Schubert et al., 2006). Sila protoka isplake tijekom cirkulacije pritišće metalnu oprugu, u nedostatku te dodatne sile tijekom cirkulacije, elastična sila u oprugama uzrokuje zatvaranje ventila (slika 5-2). Sila koja je potrebna za otvaranje opruge, određuje se i namješta na površini.



Slika 5-2. Princip rada protupovratnog ventila (Choe et al., 2007).

Još jedan problem vezan uz efekt U-cijevi je nemogućnost zatvaranja preventera prije nego li se uspostavi nova ravnoteža u sustavu. Pri pokušaju zatvaranja preventera, tlak bi prešao tlak frakturiranja sloja.

Efekt U-cijevi se javlja u svim metodama koje primjenjuju dvojni gradijent tlaka koje imaju pumpe za podizanje povratnog toka isplake. Efekt se javlja jer su bušaće šipke ispunjene otežanom isplakom dok je prstenasti prostor ispunjen isplakom do određene visine. Kada se pumpe isključe isplaka veće gustoće slobodno pada kroz bušaće šipke i razina isplake u prstenastom prostoru se povećava zbog neravnoteže tlakova te se stvara efekt U-cijevi. Ako se brzina rada površinske isplačne pumpe održava većom od brzine slobodnog pada, može se izbjeći efekt U-cijevi (Schubert et al., 2006).

Ravnoteža u sustavu ostvarit će se nakon određenog vremena, što može biti i do 20 minuta (Schubert et al., 2006). Vrijeme uspostave ravnoteže ovisi o dubini vode, gustoći isplake i dubini bušotine. Nakon stabiliziranja tlak stupca isplake unutar bušaćih šipki će se izjednačiti s tlakom stupca isplake i morske vode u prstenastom prostoru, što daje novi tlak na dno bušotine.

Kako bi se objasnio efekt U-cijevi provedena su brojna istraživanja. Otkriveno je kako na efekt U-cijevi djeluje gustoća isplake, dubina vode, dubina bušotine, viskoznost isplake, promjer bušaćih šipki te promjer mlaznica (Schubert et al., 2006).

Također među nedostatke bušenja uz primjenu dvojnog gradijenta tlaka mogu se ubrojiti korištenje podvodne tehnologije te rizik od gnječenja rajzer cijevi. Unatoč konstantnom napretku u korištenju podvodne tehnologije radi ograničenoga pristupa opremi, popravak kvarova traje duže nego popravak površinskih alatki. Mnogi vodovi, crijeva i užad koja se koriste za kontrolu podmorske opreme mogu se lako zapetljati pod utjecajem morskih struja i drugih sila. Ovo predstavlja probleme u operacijama montaže i demontaže.

Pri korištenju plina (zrak ili dušik) kao fluida unutar rajzer cijevi, potrebno je procijeniti rizik od njihova gnječenja. Hidrostatski tlak vode izvana stvara veliku razliku tlaka budući je u cijevima atmosferski tlak (Gaup, 2012).

6. Metode bušenja bez rajzer cijevi

Metode bušenja bez rajzer cijevi razvijene su kao alternative konvencionalnom rajzer bušenju u dubokom moru. U ovom radu biti će obrađene sljedeće metode:

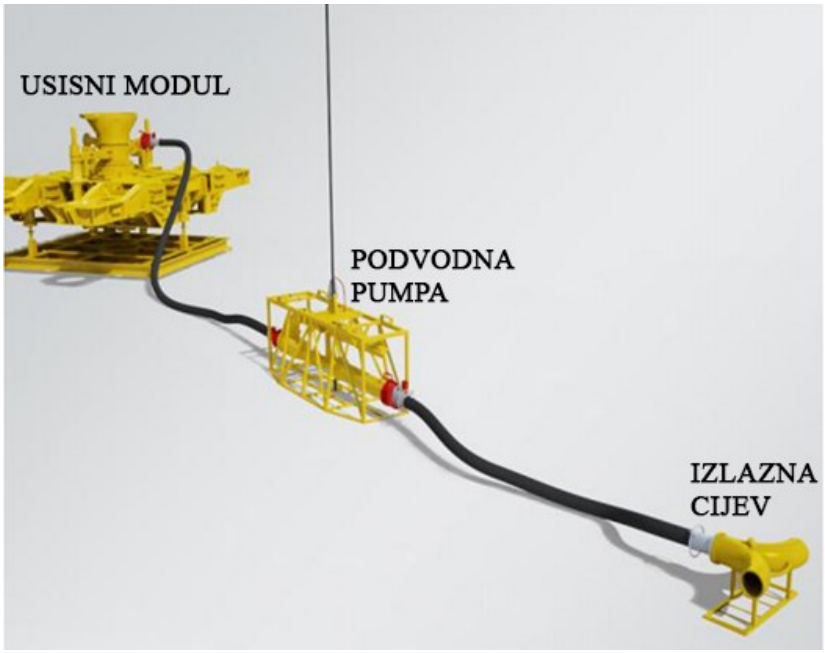
- metoda transporta krhotina (engl. *cuttings transport system*, CTS),
- metoda povrata isplake bez rajzer cijevi (engl. *riserless mud recovery*, RMR),
- metoda povrata isplake kroz E-cijev (engl. *E-duct return*, EdR),
- metoda bušenja uz istovremeno ugušivanje bušotine (engl. *dynamic kill drilling*, DKD),
- metoda bušenja uz primjenu koncentričnog niza bušaćih šipki (engl. *reelwell drilling method*, RMD).

Ova metoda bušenja dobila je naziv riserless drilling (RD) odnosno bušenje bez rajzer cijevi, upravo zbog eliminiranja konvencionalne rajzer cijevi. Prve sheme bušenja bez rajzer cijevi razvijene su još 1960-ih. Watkins (1969) je izradio prvi patent bušenja bez rajzer cijevi radi smanjenja habanja rotirajućeg preventerskog sklopa (engl. *rotating blowout preventer*, RBOP) (Choe et al., 1998).

6.1. Metoda transporta krhotina

Metoda transporta krhotina razvijena je u Norveškoj za primjenu na norveškom kontinentalnom šelfu (engl. *norwegian continental shelf*, NCS) i naširoko se primjenjivao za početno bušenje (engl. *top-hole drilling*) još od 1993. godine (Stave, 2014; Stave et al., 2014). Metoda transporta krhotina se koristi kako bi se izbjeglo akumuliranje krhotina na ili u blizini podvodne bazne ploče. Metoda koristi usisni modul kako bi skupio povratni tok isplake iz bušotine i podvodnu pumpu kako bi dopremio krhotine do mjesta za odlaganje dalje od bazne ploče (slika 6-1). Iako metoda transporta krhotina nije metoda dvojnih gradijenata, može se usporediti s „pumpaj i ispusti“ tipom dvojnih gradijenata.

Ključni ljudi koji su razvili metodu transporta krhotina uvidjeli su njegovu ekološku neodrživost, no postavljeni su temelji za razvoj metode povratka isplake bez rajzer cijevi (RMR). Razvoj metode povrata isplake bez rajzer cijevi je omogućila povratak isplake s krhotinama do površine kako bi se ponovno upotrijebila isplaka te se na siguran način zbrinule krhotine.



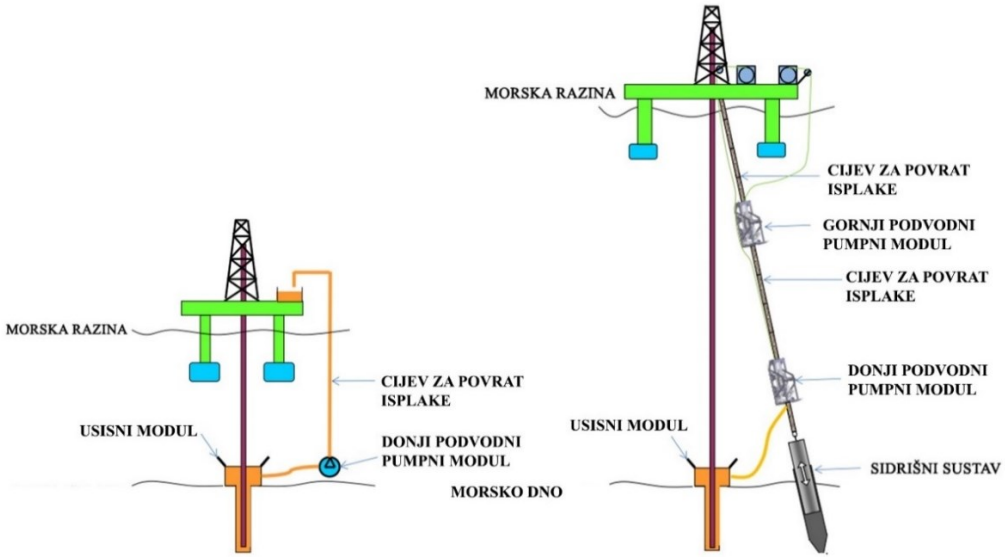
Slika 6-1. Metoda transporta krhotina na morskom dnu (Stave, 2014).

6.2. Metoda povrata isplake bez rajzer cijevi

Povratak isplake bez rajzer cijevi je proces početnog bušenja (gornja sekcija) uz primjenu otežane isplake, te spada pod metodu dvojnih gradijenata. Takvo bušenje povećava „bušaći prozor“ i omogućava bušenje s manje rizika od utoka ili erupcije plitkih plinova (Stave, 2014).

Kada je prvi put sustav isproban, radni opseg mu je bio do 549 metara dubine mora. Nakon toga formirani su udruženi projekti u cilju razvijanja tog sustava za mogućnost bušenja u ultra dubokom moru. U sklopu suradnje kompanija Shell, BP America, DEMO 200 i AGR provedena su ispitivanja 2004. godine u Sjevernom moru. Metoda je slična svom prethodniku, ali ova nova metoda za ultra duboko bušenje koristi dva podvodna pumpna modula. Na slici 6-2 su prikazana dva sustava za bušenje, primjenom metode povrata isplake bez rajzer cijevi, u dubokom (lijevo) i ultra dubokom moru (desno). Sustav koristi dva podvodna pumpna modula kako bi osigurao nesmetano podizanje povratnog toka do površine. Također je proveden uspješni projekt u Južno kineskom moru 2008. godine. Testiranjem je metoda povrata isplake bez rajzer cijevi dokazana kao optimalno rješenje za bušenje u većini područja s pojavom plitkih plinova u dubokom moru (Smith et al., 2010).

Kod metode povrata isplake bez rajzer cijevi sakupljanjem i povratkom isplake do površine, isplaka se može ponovno upotrijebiti, što zahtijeva manji volumen isplake na platformi. Ova činjenica je od velike važnosti, primjerice na udaljenim arktičkim lokacijama, jer se tako osigurava bušenje do planirane dubine bez rizika od iskorištavanje ukupnog volumena isplake ili erupcije zbog bušenja uz korištenje morske vode. Karotažna mjerenja kaliperom su pokazala da se mogu izbjeći teška ispiranja bušotine, što poboljšava kvalitetu cementiranja tako da osigurava dobro vezanje cementa sa stijenom i zaštitnim cijevima što u konačnici rezultira boljim strukturnim integritetom i zonalnom izolacijom (Stave et al., 2014).



Slika 6-2. Komponente sustava za bušenje uz primjenu metode povrata isplake bez rajzer cijevi u dubokom (lijevo) i ultra dubokom moru (desno) (Smith et al., 2010).

Dokazane prednosti bušenja uz primjenu metode povrata isplake bez rajzer cijevi su:

Glavni pokretač razvoja metode povrata isplake bez rajzer cijevi su prednosti koje su vezane za bušenje uz primjenu dvojnih gradijenata tlakova, kao što su korištenje otežane isplake pri bušenju gornjih sekcija, kontrola tlaka, kvaliteta stabilnosti kanala bušotine, poboljšavanje samog bušenja i strukturnog integriteta bušotine (Stave et al., 2014). Komponente metode bušenja uz primjenu povrata isplake bez rajzer cijevi lako se mogu montirati na bilo koji tip platforme/bušaćeg broda bez potrebe za velikim modifikacijama.

Bušenje uz primjenu povrata isplake bez rajzer cijevi ekonomski je isplativa metoda zbog mogućnosti povrata isplake koja se čisti i ponovno koristi u procesu bušenja. Zbog toga je moguće korištenje skupih i otežanih isplaka koje, bi pri konvencionalnom bušenju bile odbačene u morski okoliš. U nastavku su navedene dokazane prednosti metode (Rezk, 2013):

- uspješno bušenje kroz formacije s plitkim plinovima ili vodom,
- mogućnost ugradnje zaštitnih cijevi na veće dubine,
- uklanjanje troškova povezanih s transportom i skladištenjem isplake,
- utjecaj na okoliš je gotovo nikakav jer nema izlijevanja isplake ili je vrlo malo,
- bušenje uz primjenu otežane isplake,
- smanjenje opasnosti od zaglave bušaćih alatki,

- brže i preciznije otkrivanje dotoka slojnog fluida ili gubitka isplake,
- smanjenje neproduktivnog vremena tijekom početnog bušenja,
- povećanje brzine bušenja,
- poboljšano čišćenje bušotine.

Glavni razlozi za odabira metode povrata isplake bez rajzer cijevi

Među svim prednostima metode povrata isplake bez rajzer cijevi, u nastavku su izdvojeni i opisani glavni razlozi zbog kojih se metoda bira u odnosu na druge.

Kontrola slojnog tlaka

Pri bušenju početne sekcije, morska voda je obično primarna sigurnosna barijera u bušotini. Iako slojni tlak može biti gotovo jednak tlaku hidrostatskog stupca morske vode, gledajući od razine mora, promatrani slojni tlak na vrhu propusnog sloja koji sadrži plin ili nevezanu vodu može preći tlak u bušotini ako na njega djeluje samo hidrostatski tlak stupca morske vode. Bušotini prijeti opasnost od dotoka slojnog fluida i gubljenja isplake u sloj zbog velikog promjera bušotine te zbog efekata naglog nadtlaka kod dodavanja alatki (engl. *surge*) i naglog podtlaka kod vađenja alatki (engl. *swab*). Korištenjem metode povrata isplake bez rajzer cijevi omogućeno je korištenje otežane isplake što osigurava da je hidrostatski tlak u bušotini uvijek veći od slojnog tlaka. Nadalje, koristeći isplaku koja sadrži aditive za smanjenje filtracije (engl. *fluid loss material*), može se ostvariti kvalitetni isplačni kolač koji smanjuje gubitak isplake i dotok slojnog fludia te ostvariti dovoljan nadtlak kako bi se bušilo u granicama između slojnog tlaka i tlaka frakturiranja („bušaći prozor“) (Stave et al., 2014).

Kontrola dotoka slojnog fluida

U klasičnom početnom bušenju za ugradnju uvodne kolone ne postoji kontrola dotoka, tj. način na koji možemo utvrditi imamo li dotok slojnog fluida. Nadalje ne postoje efektivne metode praćenja i potvrde „aktivnosti bušotine“. Uvođenjem metode bušenja uz primjenu povrata isplake bez rajzer cijevi, bušotina se može pratiti jer se isplaka vraća na platformu te je tako omogućena kontrola dotoka. Pumpni sustav metode je također djelotvoran u detektiranju dotoka slojnog fluida u bušotinu ili gubljenja isplake u sloj, odnosno registriraju se promjene u protoku kroz pumpe (Stave et al., 2014).

Kvaliteta stabilnosti kanala bušotine

Isplaka se može prirediti tako da ima dovoljnu gustoću i karakteristike koje osiguravaju stabilnost bušotine kroz cijeli proces bušenja, te dovoljnu viskoznost za osiguravanje kvalitetnog čišćenja kanala bušotine od krhotina razrušenih stijena. Bušenje pomoću unaprijeđenog isplačnog sustava su pokazale superiorniju stabilnost kanala bušotine pod teškim bušaćim uvjetima i umjerenog protoka pumpi (Alford et al., 2005).

Učinkovitost bušenja

Odgovarajućom izvedbom metode povrata isplake bez rajzer cijevi bi trebao poboljšati učinkovitost bušenja, onemogućiti opasnosti tijekom bušenja i uštedjeti vrijeme. Ovo je veoma važno u arktičkim područjima gdje je mogućnost bušenja kratka zbog ciklusa zaleđivanja.

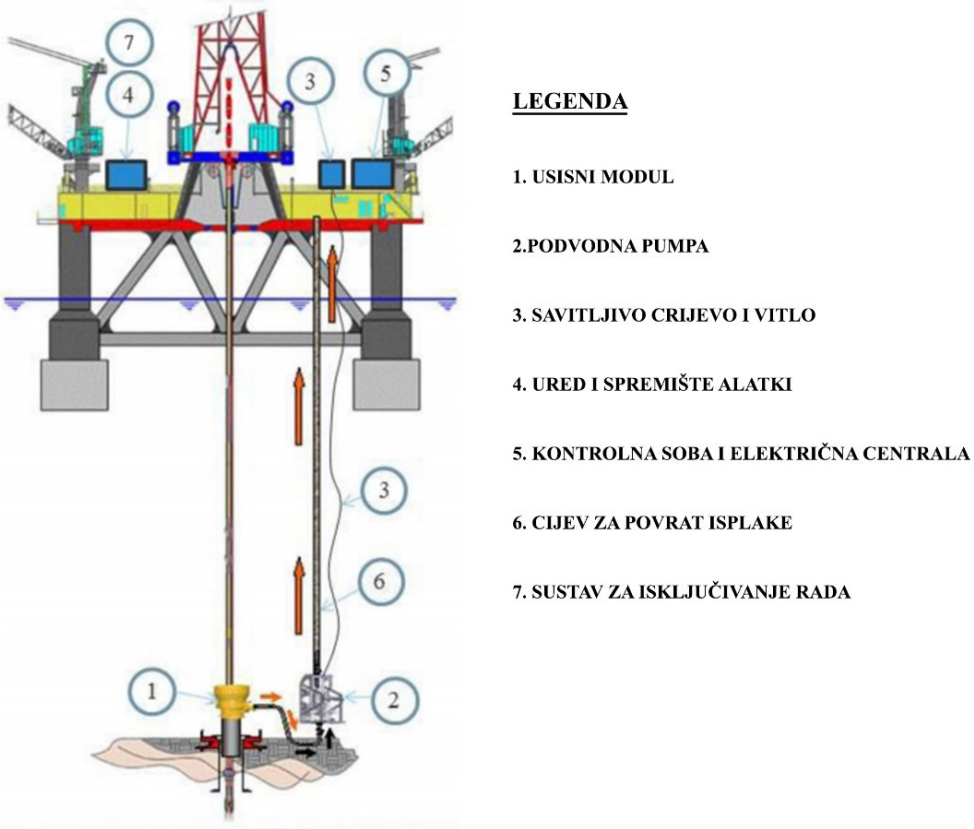
Integritet bušotine

Informacije o formaciji su omogućene kroz analizu krhotina skupljenih s vibracijskih sita. Gustoća i svojstva isplake mogu se promijeniti na temelju trenutnih podataka (engl. *real-time data*). Poboljšani uvjeti u bušotini kombinirani s mogućnošću cementiranja u uvjetima kontroliranog tlaka (engl. *managed pressure cementing*, MPC) bi trebali osigurati temelj i integritet bušotine kroz njen radni vijek. Jednolični promjer kanala bušotine će poboljšati kvalitetu veze cementnog kamena sa zaštitnim cijevima i sa stijenkom kanala bušotine te tako poboljšavati integritet bušotine.

Oprema

RMR sustav je prikazan na slici 6-3 i sastoji se od sljedećih sedam glavnih dijelova (Brown et al., 2007; Stave, 2014):

1. usisni modul (SMO),
2. podvodna pumpa (SPM),
3. savitljivo crijevo i vitlo,
4. ured i spremište alatki,
5. kontrolna soba i električna centrala,
6. cijev za povrat isplake (MRL),
7. sustav za isključivanje (dio kontrolnog sustava).



Slika 6-3. Glavni dijelovi metode povrata isplake bez rajzer cijevi (Stave, 2014).

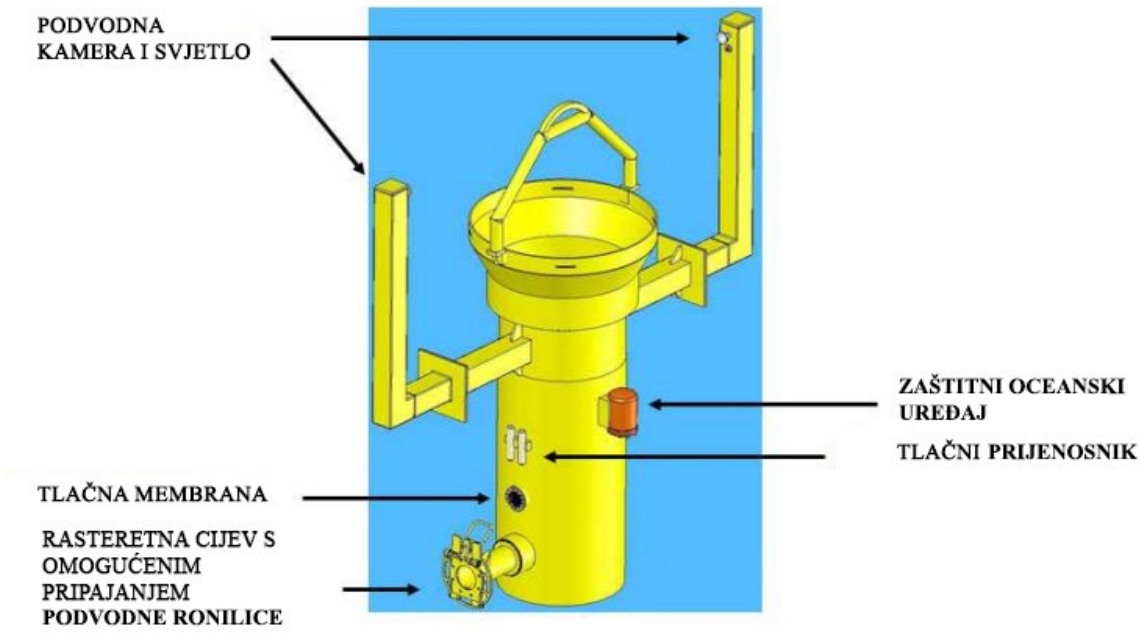
1. Usisni modul

Usisni modul ima ulogu kolektora isplake koja se vraća iz bušotine. Omogućava spajanje usisnih crijeva kojima se otpremaju isplaka i krhotine do površine. Na samom usisnom modulu se nalaze kamere, svjetla i sustav kontrole razine isplake. Usisni modul se spušta kroz središnji otvor za bušenje (engl. *moon pool*) na koloni bušaćih šipki i spaja na bušotinsku glavu za niski tlak (engl. *low pressure wellhead*) (Brown et al., 2007). Povratni tok isplake iz bušotine se skuplja u usisnom modulu i protiskuje podvodnim pumpama kroz usisno crijevo, na početku je bilo predviđeno da se usisni modul zatvori s rotacijskom kontrolnom glavom (engl. *rotating control head*) kako bi se izbjegli izljevi isplake u morski okoliš. No, tijekom bušenja za kompaniju BP u Kaspijskom jezeru, uspješno je proizveden i upotrijebljen usisni modul s kontroliranim povratom isplake (engl. *open „mud cap“*). Visoko osjetljiv i precizan tlačni prijenosnik mjeri stupac unutar usisnog modula, a kontrolni sustav upravlja protokom isplačne pumpe tako da se razina unutar modula održava konstantnom. Operater pumpe prilikom primjene metode povrata isplake bez rajzer cijevi može vidjeti razinu isplake unutar usisnog modula na monitoru preko podvodnih kamera. Kada se postigne zadovoljavajuća razina, operater aktivira automatski način i program

održava konstantnu razinu isplake u usisnom modulu, prilagođavajući protok pumpe (Stave et al., 2014). Slika 6-4 prikazuje dijelove usisnog modula kojima se osigurava željena razina isplake.

Dijelovi usisnog modula:

- podvodne kamere i svjetla,
- kontrolni zaštitni oceanski uređaj (engl. *protective oceanic device,* POD),
- tlačne membrane,
- tlačni prijenosnik,
- rasteretna cijev s omogućenim pripajanjem podvodne ronilice (engl. *remotely operated vehicle*, ROV).



Slika 6-4. Sastavni dijelovi usisnog modula (Stave et al., 2014).

Dostupne su dvije vrste adaptera za ugradnju usisnog modula na bušotinsku glavu:

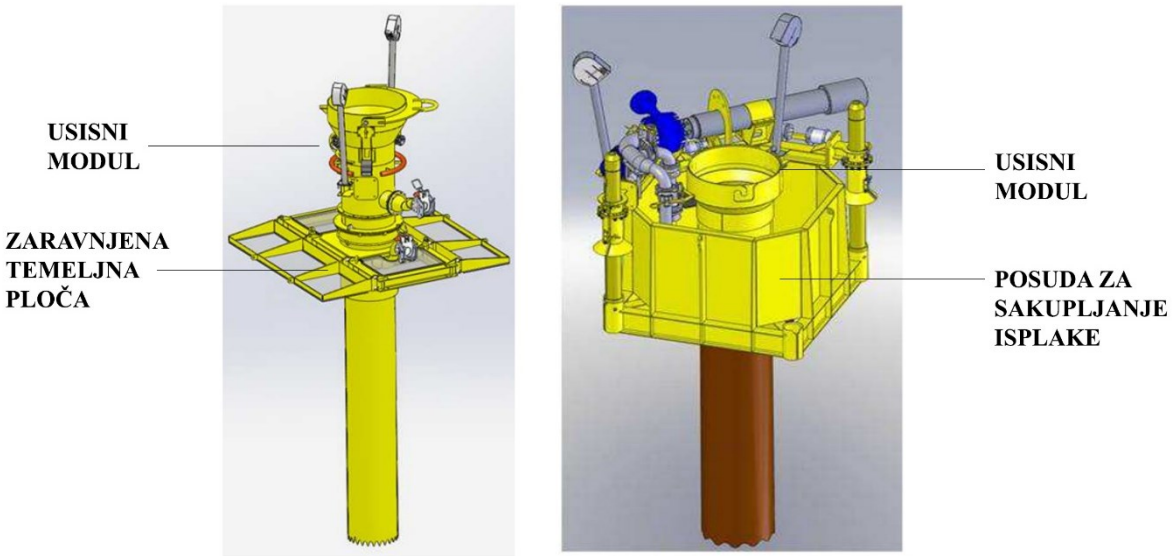
- vanjski adapter koji omogućava cementaciju u uvjetima kontroliranog tlaka i ugradnju zaštitnih cijevi bez vađenja usisnog modula,
- unutarnji adapter koji se tipično koristi na temeljnim pločama (engl. *templates*) gdje su omogućeni drugi načini povratka cementne kaše.

Temeljna ploča

U okolišima u kojima se zakonski zabranjuje ispuštanje isplake koristi se posebno izrađena temeljna ploča (engl. *spud base*). Temeljna ploča omogućava bušenje kanala bušotine promjera 0,9144 m (36“), ugradnju i cementiranje konduktor kolone s povratnim tokom isplake do površine. Temeljna ploča ima „rukavac“ (engl. *skirt*) koji uz pomoć gravitacije i rotacije probija morsko dno. Veličina „rukavca“ je određena na temelju vrste i proračuna čvrstoće tla.

Postoje dvije vrste temeljne ploče (slika 6-5):

- temeljna ploča je jednostavna „zaravnjena baza“ (engl. *mud-mat*) koja se oslanja na morsko dno te se na njoj nalazi usisni modul koji se može mijenjati,
- temeljna ploča koja ima posudu za prikupljanje isplake koja se može preliti iz usisnog modula.



Slika 6-5. Vrste temeljnih ploča, zaravnjena baza (lijevo) i posuda za prikupljanje isplake (desno) (Stave et al., 2014).

2. Podvodni pumpni modul

Podvodni pumpni modul (SPM) služi kao nosač za motor i pumpu (slika 6-6). Spojen je s usisnim modulom putem fleksibilne cijevi. Strujni vod osigurava električnu energiju kamerama, svjetlima i senzoru razine na usisnom modulu. Ovaj modul omogućava bežično upravljanje protočnim ventilom na ispusnoj strani, ispustom za povratak cementne kaše te sučeljem kontrolnog sustava. Podvodni Pleuger motor (www.flowserve.com) je ispunjen mješavinom vode i glikola. Brzina rada motora, dakle protok pumpe kontroliran je pogonom promjenjive frekvencije (VFD). Discflo pumpa (discflo.com) je prošla brojna testiranja te

joj se učinkovitost povećala i do 50% što je zadovoljavajuće za tu vrstu pumpe (Stave et al., 2005; Brown et al., 2007).



Slika 6-6. Podvodni pumpni modul (Choe et al., 2007).

3. Savitljivo crijevo i vitlo

Vitlo i crijevo omogućuju dovod električne struje te povezuje kontrolni kontejner i podvodni pumpni modul. Ukupna duljina crijeva je optimirana prema radnoj dubini na kojoj se nalazi pumpni modul. Vitlo je rađeno prema Norsok Z-015 (www.standard.no) i DNV 2.7.1 (www.dnvgl.com) propisima (Brown et al., 2007).

4. Kontrolni sustav

Kontrolni sustav upravlja brzinom rada pumpi kako bi se održala odgovarajuća razina isplake u usisnom modulu, kako bi se izbjeglo prelijevanje isplake u morski okoliš. Kontrolni sustav je distribuiran između kontrolnog kontejnera i podvodnog pumpnog modula. Sustavom se upravlja računalom zaštićenim protueksplozijskom zaštitom koje se nalazi u bušaćoj kabini (Brown et al., 2007).

Prvi kontrolni sustav metode povrata isplake bez rajzer cijevi je bio manualni. Pogon promjenjive brzine (engl. *variable speed drive*) i brzina hoda pumpe se je ručno kontrolirala softverom baziranim na programu Labview (www.ni.com) pokrenutom iz bušaće kabine s prijenosnog računala u Windows operativnom sustavu. Usisni modul je opremljen podvodnim kamerama te je tako operater za bušenje uz primjenu metode povrata isplake bez rajzer cijevi mogao vidjeti razinu isplake unutar usisnog modula na svom monitoru. Koristeći tipke strelica s tipkovnice mogao je povećati ili smanjiti broj hodova pumpe kako bi zadržao isplaku na željenoj razini. Usisni modul je nakon toga opremljen s vrlo točnim diferencijalnim tlačnim prijenosnikom koji je mjerio diferencijalni tlak između stupca isplake unutar usisnog modula i vanjskog hidrostatskog tlaka te tako dobivao hidrostatski

tlak stupca isplake unutar usisnog modula. Automatski kontrolni sustav je implementiran tako da je uveden proporcionalno integrirani derivacijski kontroler (engl. *propotional integral derivate*, PID) koji se nalazi u pogonu promjenjive brzine te kao referencu koristi mjerenje razine (Stave, 2014).

5. Kontrolni kontejneri i električna centrala

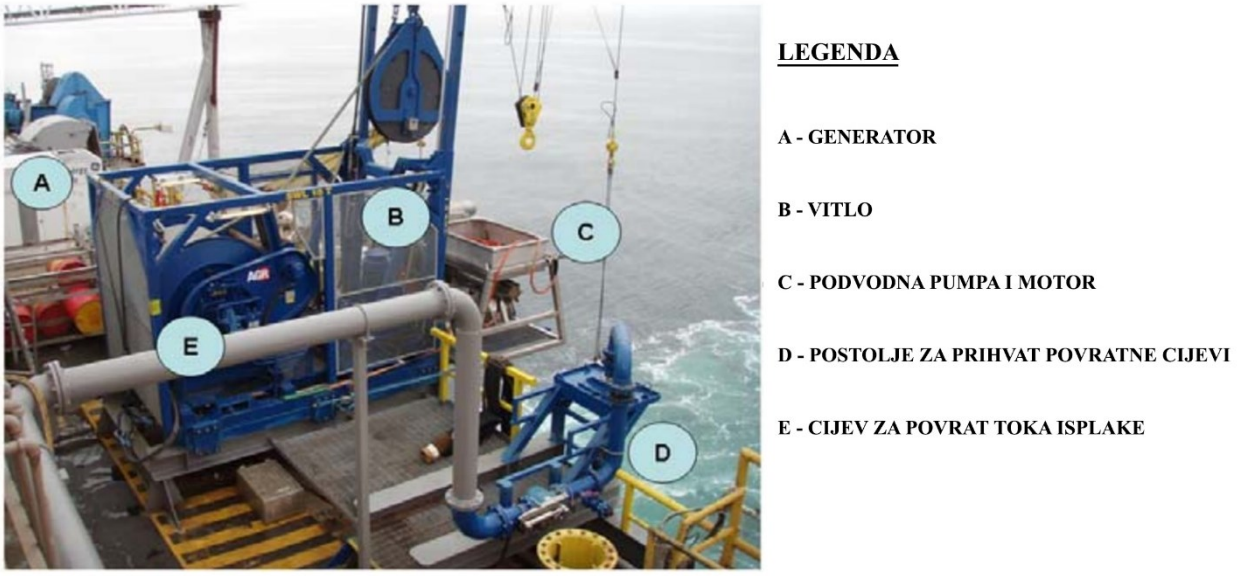
Kontrolni kontejner je čvorišno mjesto u kojem su povezani svi kontrolni sustavi. Jedna jedinica pod tlakom služi posadi kao radni prostor i operaterova je radna stanica. Druga jedinica pod tlakom sadrži pogon promjenjive brzine, transformator, sustave za filtraciju i kontrolu kako bi omogućili sučelje između postrojenja i sustava. Transformator snage 3 kW je postavljen kako bi se omogućila optimizacija kablova raznih veličina. Monitori kontrolnog sustava prikazuju protok i tlakove pumpi te nadgledavaju i održavaju stabilnu razinu isplake u usisnom modulu. Kontrolni sustavi su napravljeni prema propisima Norsok Z-015 i DNV 2.7.1 (Brown et al., 2007).

6. Cijev za povrat toka isplake

Cijev za povrat toka isplake omogućuje povratak toka isplake iz kanala bušotine do platforme. Sastoji se od petnaest metarskih sekcija, spojenih lako odpojivim kolčacima, promjera 0,1524 m (6“) napravljenih od izdržljivog materijala. Vlačna čvrstoća crijeva je pojačana pomoću žica koje podnose velika opterećenja. Preko lako spojivog konektora za podvodnu ronilicu (ROV) se spaja povratno crijevo na pumpni modul. Postolje za prihvat cijevi za povrat isplake, kao i ostatak površinske opreme je prikazan na slici 6-7. Postolje se sastoji od izbačenog dijela („izbačeno rame“), na koje se prenosi težina crijeva tijekom bušenja. Krute cijevi spajaju razvodnik s vibracijskim sitom (Brown et al., 2007).

7. Sustav za isključivanje procesa bušenja

Sustav za isključivanje dio je kontrolnog sustava, a funkcija mu je hitno isključivanje. Sustav je konfiguriran s dva prekidača za isključivanje, jedan na radnom podištu, a drugi u kontrolnom kontejneru.



Slika 6-7. Dio površinske opreme (Brown et al., 2007).

Dodatna oprema metode povrata isplake bez rajzer cijevi

Oprema potrebna za bušenje u ultra dubokim morima se razlikuje od uobičajene opreme za bušenje u dubokom moru. Dodatna oprema opisana je u nastavku (Smith et al., 2010).

Podvodni elektronski modul (engl. *subsea electronics module*, SEM) je napravljen od tankog nosača s vlastitom plovnošću kako bi smanjio težinu usisnog modula. U njemu je smještena elektronika usisnog modula. Na morsko dno se spušta zajedno s donjim podvodnim pumpnim modulom (engl. *lower subsea pump module*, SPM), te se spaja na usisni modul pomoću podvodne ronilice.

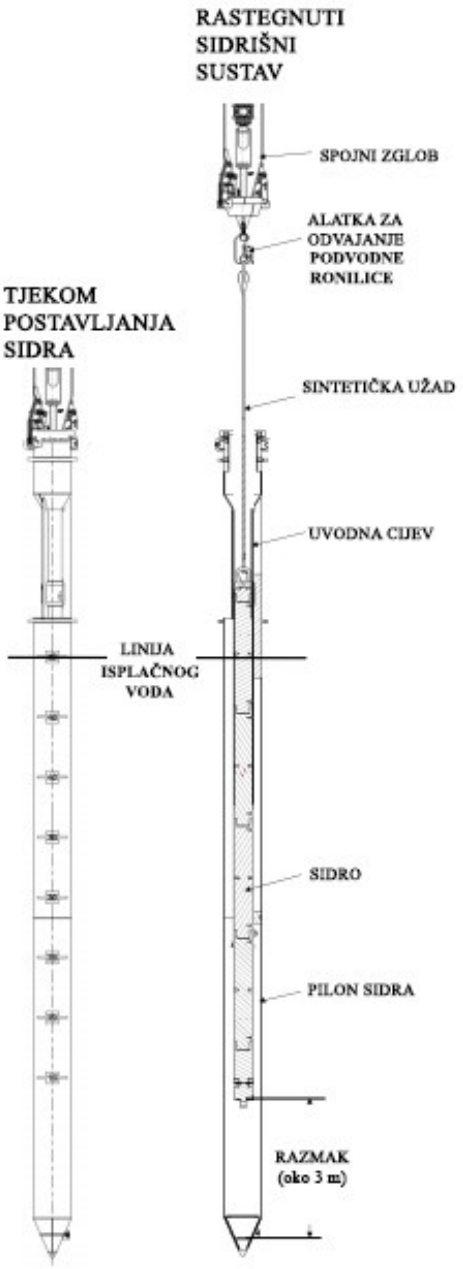
Usisna cijev spaja usisni modul s donjim spojnim zglobom (engl. *lower docking joint*, LDJ). Težina uronjene usisne cijevi se smanjuje dodatkom plovaka radi lakše instalacije pomoću podvodne ronilice (slika 6-8).



Slika 6-8. Usisna cijev (lijevo) i donji spojni zglob spojen na sidrišni sustav (desno) (Smith et al., 2010).

Donji spojni zglob (LDJ) se linijski povezuje s cijevi za povratni tok isplake. Njegova zadaća je spajanje donjeg pumpnog modula s cijevi za povratni tok isplake i spajanje usisne i ispusne cijevi s pumpnim modulom. Uz dopuštanje lakšeg spajanja pumpnog modula i cijevi za povratni tok isplake na površini, donji spojni zglob također omogućava spajanje sidrišnog sustava cijevi povratnog toka isplake (engl. *MRL anchoring system*) i same cijevi povratnog toka isplake (slika 6-8). Donji spojni zglob sadrži posebnu spojnicu otpornu na naprezanja (engl. *stress joint*) koja se sužava na vrhu kako bi se smanjio zamor zbog vibracija uzrokovanih vrtlozima (engl. *vortex induced vibration*, VIV).

Sidrišni sustav cijevi povratnog toka isplake učvršćuje donji kraj cijevi povratnog toka isplake za morsko dno. Odmaknut je od bušotine i kolone bušaćih šipki zbog sprječavanja kolizije. Nakon postavljanja, sidrišni sustav se rasteže kako bi osigurao čvrstu vezu s morskim dnom i dovoljan nateg u sustavu (slika 6-9). Sidro cijevi povratnog toka isplake dopušta kretanje cijevi povratnog toka isplake zajedno s kretanjem platforme, kako bi se na površini mogao upotrijebiti kruti sustav vješanja. Sidrišni sustav cijevi povratnog toka isplake nije napravljen da onemogući vertikalna kretanja, već samo horizontalna kako bi držao cijevi povratnog toka isplake podalje od bušotinske glave.



Slika 6-9. Postavljanje i dijelovi sidrišnog sustava (Smith et al., 2010).

Donji podvodni pumpni modul (engl. *lower subsea pump module*) sadrži tri disk pumpe na električni pogon koje pogone isplaku s krhotinama, uz minimalno oštećenje krhotina. Disk pumpe omogućavaju prolazak česticama promjera do 0,0508 m (2“). Spajanje donjeg pumpnog modula s donjim spojnim zglobom odvija se na površini upotrebom okvira za rukovanje (engl. *handling frame*).

Cijev za povratni tok isplake osigurava vezu s morskim dnom i površinom, omogućuje prolazak povratnog toka isplake te je dovoljne čvrstoće da podržava dva pumpna modula i težinu sidra te da se opire morskim strujama i kretanju plovila. Cijev za povratni tok isplake

se sidri na morsko dno i visi s površine na zglobu vješalice (engl. *hang off joint*, HOJ), smještenom na modulu za vješanje (engl. *hang off module*, HOM).

Gornji spojni zglob (engl. *upper docking joint*, UDJ) postavlja se u liniji s cijevi za povratni tok isplake blizu polovine dubine mora i omogućava spajanje gornjeg pumpnog modula (engl. upper subsea module) i cijevi za povratni tok isplake. Gornji spojni zglob sadrži sužene zglobove za smanjenje utjecaja vibracija uzrokovanih vrtlozima.

Gornji pumpni modul sličan je donjem pumpnom modulu, a spaja se s gornjim spojnim zglobom na površini primjenom okvira za rukovanje te tako pruža čvrstu strukturnu vezu za usisne i ispusne cijevi.

Okvir za rukovanje pumpnim modulom služi za prenošenje pumpnog modula do bušaćeg otvora kako bi se montirao na spojne zglobove.

Modul za vješanje služi za osiguravanje cijevi za povratni tok isplake pomoću zgloba vješalice na površini.

Protočna glava ventilima osigurava izoliranje cijevi za povratni tok isplake od niskotlačnih cijevi spojenih s opremom za obradu isplake i omogućuje vezu za pomoćne cijevi.

Vitlo (nosivosti 25 t) služi kao spremište vodova za komunikaciju i dovod energije donjem pumpnom modulu i podvodnom elektronskom modulu, dok vitlo nosivosti 10 t služi za dovod energije gornjem pumpnom modulu. Oba vitla su prikazana na slici 6-10.



Slika 6-10. Vitlo nosivosti 25 t (lijevo) i vitlo nosivosti 10 t (desno) (Smith et al., 2010).

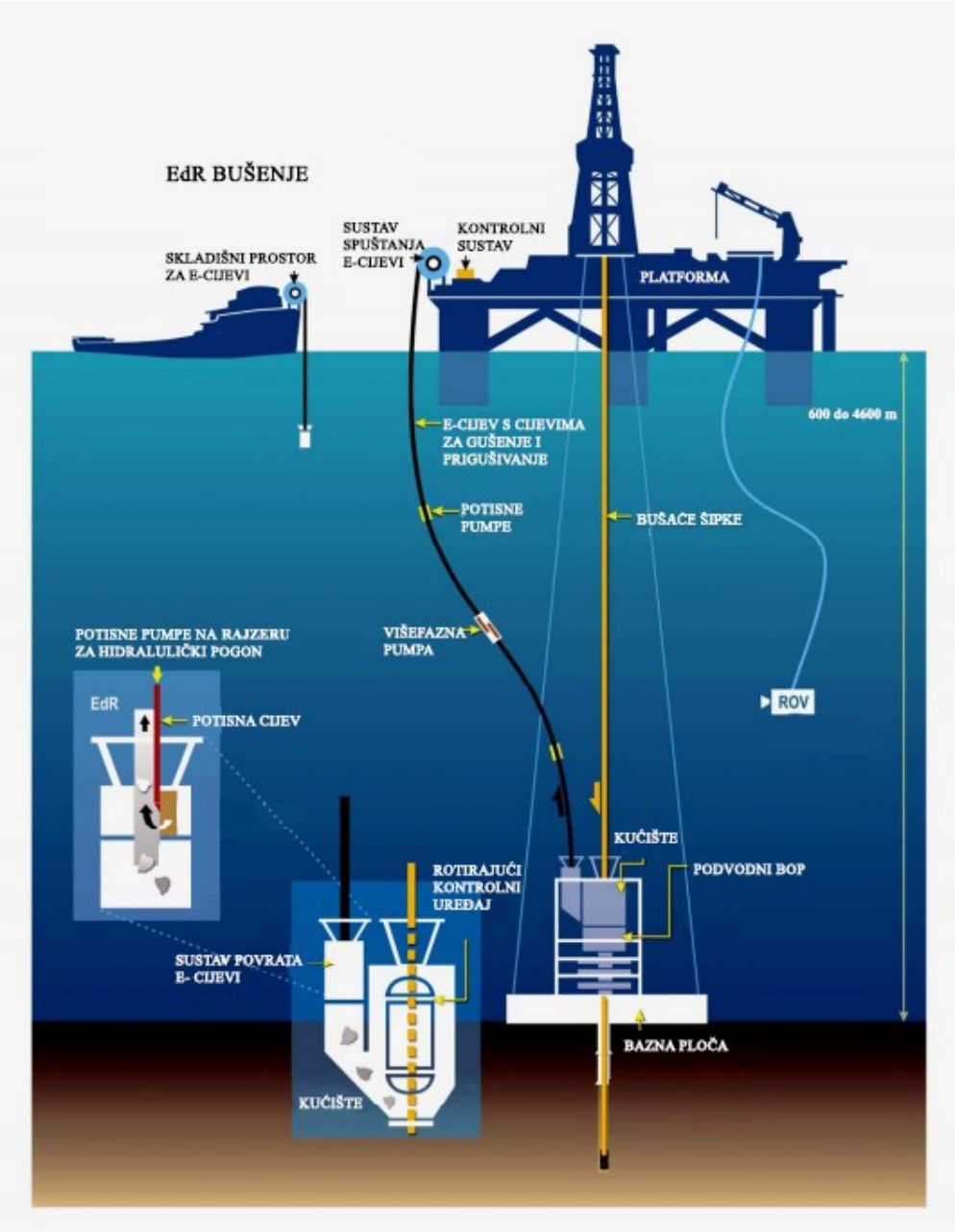
Pomoćni prijenosni dizelski generatori služe za dovod dodatne električne energije koju zahtijeva sustav zbog ograničene električne energije na plovilu.

Cementiranje u uvjetima kontroliranog tlaka

Cementiranje u uvjetima kontroliranog tlaka (MPC) je razvijena kao dodatna metoda povrata isplake bez rajzer cijevi. Ovom metodom cementna kaša i isplaka se skupljaju u usisnom modulu i povodnim pumpama se odvode kroz cijev za povrat isplake do platforme te tako tvore zatvoreni sustav (engl. *closed loop system*).
Kod konvencionalnog cementiranja početne sekcije česte su pojave mikropukotina u cementnom kamenu i naknadnog dotoka unatoč uspješnoj cementaciji. Cementacija u uvjetima kontroliranog tlaka metodom može biti poboljšana zbog mogućnosti kontrole tlaka tijekom cirkulacije, čime se izbjegavaju gubici i utoci pri samoj operaciji. Nakon postavljanja cementne kaše tlak se i dalje može pratiti tijekom stvrdnjavanja, kako bi se dokazala uspješnost zahvata, tj. strukturni integritet cementnog kamena (Stave, 2014).

6.3. Metoda povrata isplake kroz E-cijev

Metoda povrata isplake kroz E-cijev uključuje postojeću opremu i neke nove alatke. Primarni bušaći alat se sastoji od „E-Duct“ tubing sustava i povezanog „E-Duct Return“ podvodnog modula koji služi kao bušaća cijev i cijev za povratak krhotina. Promjene na podvodnom preventerskom sklopu i malo podvodno kućište za kontrolu tlaka omogućuju da „E-Duct“ cijev pomaže pri povratnom toku isplake tijekom procesa bušenja bez rajzer cijevi. Primjenom metode povrata isplake kroz E-cijev omogućena su bušenja u odobalnom dubokomorskom okolišu na dubinama od 600 m do 4 500 m (Carter et al., 2005). Slika 6-11 prikazuje „EdR“ metodu sa svom pripadajućom opremom te shematski prikaz načina rada.



Slika 6-11. Metoda povrata isplake kroz E-cijev (Carter et al., 2005).

Oprema

Opremu čine bušaće šipke, podvodni preventerski sklop s baznom pločom i vodilicama, zatezači vodilica, potisne pumpe koje aktiviraju potisne fluide (engl. *motive fluids*) te podvodna ronilica kojom se upravlja s platforme, a koja pomaže pri navođenju i podmorskom promatranju. Sustav za povratak isplake se sastoji od nove „E-Duct Return“ jedinice (EdR) i podvodnog rotirajućeg kontrolnog uređaja (engl. *rotating control device*, RDC). „E-Duct Return“jedinica smješta se na brodu s dinamičkim pozicioniranjem.

Kompozitna cijev male težine je namotana na bubnjeve. Svaki namotani kalem cijevi je montiran na jedan do šest bubnjeva koji su smješteni na krmi pomoćnog broda. Svaka jedinica sadrži otprilike 300 m do 600 m namotane cijevi, pojedinačne mase od otprilike 9 t (20 000 lbs). Kada su sve cijevi dovedene na morsko dno, posljednji bubanj koji je montiran na bušaću platformu, spušta se i spaja s cijevi koja je već spuštena s pomoćnog plovila.

Nove alatke koje se u ovom sustavu primjenjuju su visoko učinkoviti eduktori, pumpe i potisni alati te vodovi izrađeni od visoko otpornih materijala poput poliuretana ili fleksibilnih legura (Carter et al., 2005).

Prednosti metode povrata isplake kroz E-cijev

Glavna prednost metode povrata isplake kroz E-cijev nad standardnim bušenjem s rajzer cijevima jesu smanjeni troškovi za 50% kapitalnog ulaganja i zamjetno smanjenje drugih povezanih troškova proizašlih iz potrebnih velikih količina isplake i određenih kapaciteta nosivosti. Troškovne uštede povezane s implementiranjem ove metoda su (Carter et al., 2005):

- uklanjanje troškova povezanih s održavanjem zatezanja rajzer cijevi,
- eliminiranje kapitalnih troškova povezanih s rajzer cijevima,
- eliminiranje značajnih troškova volumena isplake koji su potrebni da se napune rajzer cijevi,
- značajno smanjeni troškovi inspekcija i održavanja,
- eliminiranje troškova koji su povezani uz zaštitu od vibracija uzrokovanih vrtlozima,
- unapređivanje postojećih starijih generacija platformi nije potrebno pošto su manji zahtjevi za nosivošću i lakša je oprema.

Korištenjem metode povrata isplake kroz E-cijev smanjuju se rizici povezani sa sustavom rajzer cijevi jer:

- nema zamora materijala rajzer cijevi ili curenja iz spojeva,
- vodovi za prigušivanje (engl. *choke line*) i gušenje (engl. *kill line*) bušotine nisu povezani,
- više nema rukovanja rajzer cijevima,
- postoje manja ograničenja dovoljnog kuta otklona rajzer cijevi,
- omogućeno je brže otpajanje u slučaju nevremena.

6.4. Metoda bušenja uz istovremeno ugušivanje bušotine

Prema Dieffenbaugher et al. (2005), za metodu bušenja bez rajzer cijevi, poznatom pod nazivom bušenje uz istovremeno ugušivanje bušotine (DKD), dokazana je uspješna ugradnja dubljih sekcija zaštitne cijevi, u dubokim i ultra dubokim morima (Johnson i Rowden., 2001). Prema Pelletier et al. (1999) ova metoda je prvotno razvijena kako bi se riješili neki problemi povezani s konvencionalnim bušenjem bez rajzer cijevi te plitkim plinovima. Ova metoda primjenjiva je i za plitke formacije s uskim bušaćim prozorom pošto omogućuje precizno upravljanje ekvivalentnom gustoćom isplake (ECD). Uporabom metode bušenja uz istovremeno ugušivanje bušotine koristi se metoda dvojnih gradijenata, što garantira odličnu kontrolu tlaka na dno bušotine. Kako se povećava dubina bušenja, gradijent tlaka uzrokovan gustoćom isplake će se također povećati (Pessanha et al., 2015).

Također, metoda bušenja uz istovremeno ugušivanje bušotine može unaprijediti stabilnost gornje sekcije i poboljšati kvalitetu cementacije. Druge prednosti ove metode su prikazane u radu Geng et al. (2012). Ova metoda kombinira dobru bušaću praksu, dozvoljava mijenjanje svojstava isplake tijekom bušenja i drastično smanjuje potrebu za skladištenjem velikih volumena isplake na brodu ili platformi.

Budući da hidrostatski tlak stupca vode tijekom bušenja nije dovoljan da drži slojni tlak pod kontrolom, ukoliko se tijekom bušenja naiđe na plinsku leću (plitki plin), dolazi do ekspanzije plina prema površini što može rezultirati brojnim problemima. Stoga je kontrola dotoka veoma bitna prije ugradnje tehničke kolone i namještanja preventera, što upravo pruža metoda bušenja uz istovremeno ugušivanje bušotine. Cilj ove metode je miješanje morske vode s otežanom isplakom kako bi se napravila serija isplaka različitih gustoća, koje se potom utiskuju u bušotinu pri velikim brzinama. Kod metode bušenja uz istovremeno ugušivanje bušotine, kao što sam naziv ukazuje, nije potrebno čekanje da isplaka uz koju se bušilo procirkulira kako bi se koristila isplaka za ugušivanje

Kako bi se metoda uspješno provela potrebno je pratiti proceduralne korake (Geng et al., 2012):

- Parametri za gušenje bušotine (kao što su gustoća isplake, protok pumpe itd.) se moraju proračunati prema rezultatima mjerenja bušotine te kapacitetu platforme. Ako je tlak frakturiranja nizak, morska vode treba se koristiti pri velikim brzinama.
- Ukoliko se prilikom bušenja naiđe na plitki plin, bušenje bi se trebalo zaustaviti što je prije moguće te se trebaju zabilježiti opažanja.

- Ako se operacija gušenja bušotine provodi prema zapažanjima, gušenje bi se trebalo provoditi s već proračunatim protokom pumpi te s isplakom za gušenje koja je miješana s opremom metode bušenja uz istovremeno ugušivanje bušotine. No, protok ne bi trebao biti prevelik kako se ne bi premašio tlak frakturiranja sloja.
- Protok pumpe je podešen prema rezultatima simulacije. Na početku provođenja operacije ugušivanja bušotine, potreban je veliki protok pumpi kako bi se uravnotežio slojni tlak. Potom bi se protok trebao smanjiti proporcionalno rastu tlaka na dno.
- Tlak formacije plitkog plina je procijenjen na temelju gustoće isplake za ugušivanje. Nakon uspješno provedenog procesa ugušivanja, pri bušenju kroz sloj plinske zone koristi se isplaka s određenom gustoćom.

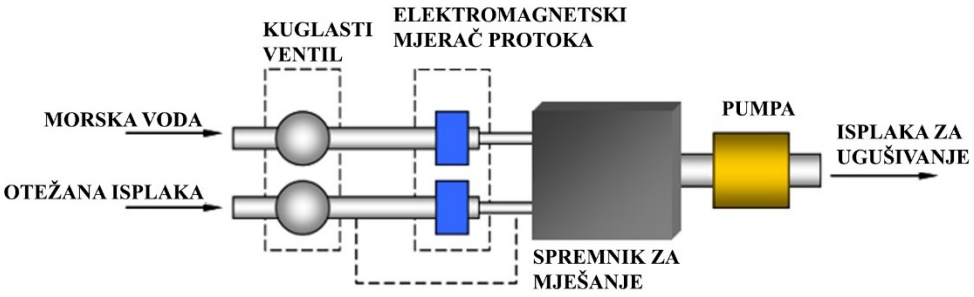
Ključni parametri metode bušenja uz istovremeno ugušivanje bušotine su gustoća isplake za ugušivanje, protok za ugušivanje te ukupan volumen već otežane isplake. Iznos tlaka trenja prilikom cirkuliranja zbrojen s hidrostatskim tlakom trebao bi biti veći od slojnog tlaka, ali manji od tlaka frakturiranja:

$$P_k + P_f + P_{mv} \geq P_{sl} \tag{6-1}$$

gdje je P_k hidrostatski tlak isplake za ugušivanje; P_f tlak trenja prilikom cirkuliranja; P_{mv} hidrostatski tlak morske vode; P_{sl} slojni tlak plinske zone.

Oprema

Postupak računanja parametara za ugušivanje bušotine je složen, posebno za bušenje *in situ*. Nepouzdanost ležišnih parametara i složenost računa zajedno povećavaju složenost ukupnog računa. Ako se postupak računanja provede unaprijed s većinom razmotrenih ležišnih i operativnih uvjeta, može se napraviti operacijski dijagram.
Određena gustoća isplake za ugušivanje se priređuje u automatiziranom uređaju za miješanje koji može automatski određivati gustoću isplake. Potom se isplaka za ugušivanje velikim protokom utiskuje u bušotinu. Uređaj za miješanje je sličan cementnog agregatu po principu rada. Njegova glavna funkcija je brzo i precizno određivanje gustoće isplake. Uređaj se sastoji od dvije cijevi za dovod fluida i jedne ispusne cijevi. Jedna cijev služi za dovod fluida (morske vode), a druga za već otežanu isplaku. Ispusna cijev je spojena s isplačnim bazenom. Shema uređaja se prikazana je na slici 6-12.



Slika 6-12. Shema uređaja za miješanje isplake metode bušenja uz istovremeno ugušivanje bušotine (Geng et al., 2012).

Još jedna važna značajka metode bušenja uz istovremeno ugušivanje bušotine je mjerenje u stvarnom vremenu. Tlačni parametri mogu se mjeriti uređajem za mjerenje anularnog tlaka tijekom bušenja (engl. *annular pressure while drilling,* APWD), a svi neuobičajeni uvjeti u podmorju se mogu uočiti podvodnom ronilicom. Kada se ustanovi dotok plina, nakon ručnog unosa gustoće, uređaj za miješanje omogućuje trenutno utiskivanje isplake za ugušivanje bušotine.

Glavne prednosti bušenja uz istovremeno ugušivanje bušotine:

- povećanje stabilnosti stjenki bušotine i zadržavanje strukturnog integriteta formacije,
- sprječavanje otapanja soli i ispiranja bušotine,
- dobra kontrola usmjerenog bušenja,
- povećanje dubine postavljanja pete zaštitnih cijevi promjera 0,508 m/0,61 m (20“/24“),
- eliminiranje nepotrebnih kolona zaštitnih cijevi,
- upravljanje golemim količinama fluida potrebnim za ispiranje tijekom bušenja određene sekcije,
- smanjenje logistike kako bi se eliminiralo vrijeme stajanja postrojenja (neproduktivnog vremena),
- onemogućavanje dotoka plitkih plinova/tekućina u kanal bušotine.

6.5. Metoda bušenja uz primjenu koncentričnog niza bušaćih šipki

Kompanija Reelwell AS razvila je metodu bušenja uz primjenu koncentričnog niza bušaćih šipki (RDM) 2005. godine kada je pokrenut gospodarski projekt - Joint Industry Project (JIP) u kojem su osim kompanije Reelwell AS sudjelovali Shell, StatoilHydro i Norwegian Research Council (Vestavik, 2008). Posebne značajke ove metode su dokazane kroz nekoliko pilot testova i teoretskih studija. Test punih razmjera je proveden u ožujku

2009. godine u testnom centru Ullrigg (www.iris.no) koji se nalazi na Međunarodnom institutu (International Research Institute of Stavanger, IRIS) u Stavangeru, Norveška. Uspješni rezultati su pokazali da je metoda učinila velika poboljšanja od kad je projekt proveden i da je spremna za uporabu (Rajabi et al., 2010).

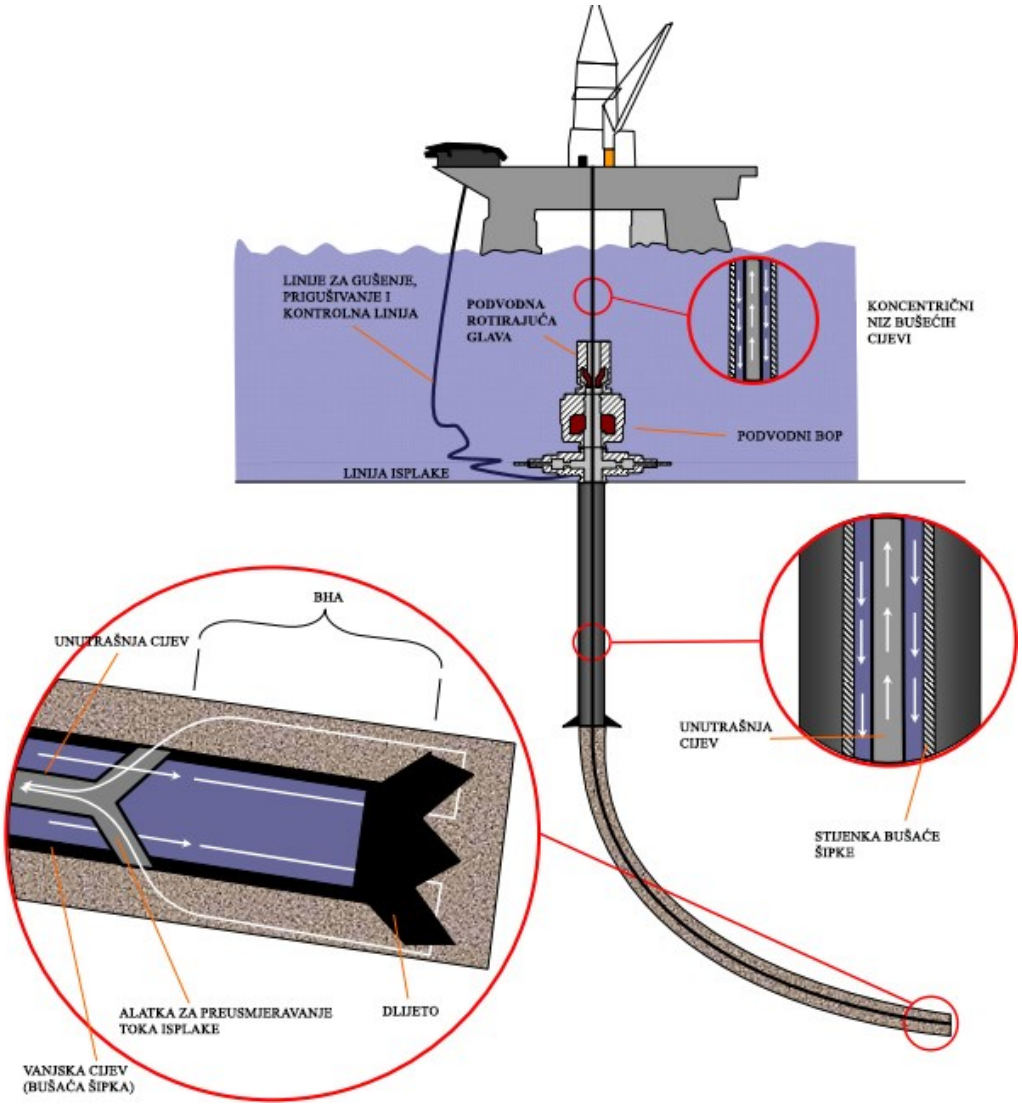
Razvijena metoda nazvana je „Reelwell Drilling Method“ te se sastoji od koncentričnog niza cijevi (slika 6-13). Kod metode bušenja uz primjenu koncentričnog niza bušaćih šipki rajzer cijevi su zamijenjene posebno dizajniranom uskom cijevi koja se nalazi unutar bušaće šipke, a čija je uloga da na nekonvencionalan način prenosi krhotine do površine. Na taj način je omogućeno bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka. Razvodnik je opremljen automatskim sustavom koji održava i prilagođava tlak na dno bušotine kako bi se brže bušilo kroz stijene s malim razlikama u vrijednosti tlakova radi izbjegavanja problema kontrole tlaka u bušotini.

Metoda predstavlja rješenje za svladavanje izazova vezanih uz bušenje u dubokim i ultra dubokim morima bez potrebe za skupim bušaćim platformama pete i šeste generacije. Budući da je eliminirana potreba za rajzer cijevima također nisu potrebni svi dodaci rajzer sustavu kao što su dovoljan prostor za skladištenje cijevi, sustav koji ostvaruje dovoljan nateg na rajzer cijevi te sustav za pozicioniranje platforme u veoma uske operativne gabarite kako bi se bušenje odvijalo bez prekida. Pomoću ove metode mogu se koristiti i platforme treće i četvrte generacije kako bi bušile u ultra dubokim morskim okruženjima s puno manje poteškoća i tehničkih ograničenja (Rajabi et al., 2010).

Kako bi se platforma prenamijenila nije potrebno puno modifikacija. Gotovo sva trenutna bušaća postrojenja (brodovi, platforme) potencijalni su kandidati za prenamjenu za bušenje primjenom ove metode. Sustavi za pozicioniranje mogu biti poboljšani tako da se operacijski radijus u ultra dubokim morima poveća na 15% do 20% dubine mora, za razliku od konvencionalnog koji iznosi 10% dubine mora. Ovakav radni radijus dovodi do fleksibilnijeg održavanja postrojenja, jeftinijeg sidrišnog sustava te manjih i jeftinijih propelera. Takav način održavanja postrojenja u širem radijusu djelovanja će smanjiti neproduktivno vrijeme čekanja na vremensku prognozu te će takav način omogućiti goleme uštede posebno u teškim uvjetima rada. Također, slučajevi pomicanja će se smanjiti zbog šireg operativnog područja.

Prednosti metode bušenja uz primjenu koncentričnog niza bušaćih šipki pri bušenju u dubokom moru su ekonomska isplativost koja je rezultat bušenja s manjim postrojenjima, povećanje dubine bušenja, smanjeno čekanje na povoljnu prognozu vremena (engl. *wait on*

weather), smanjeno neproduktivno vrijeme te poboljšana primarna kontrola tlaka (Rajabi et al., 2010).

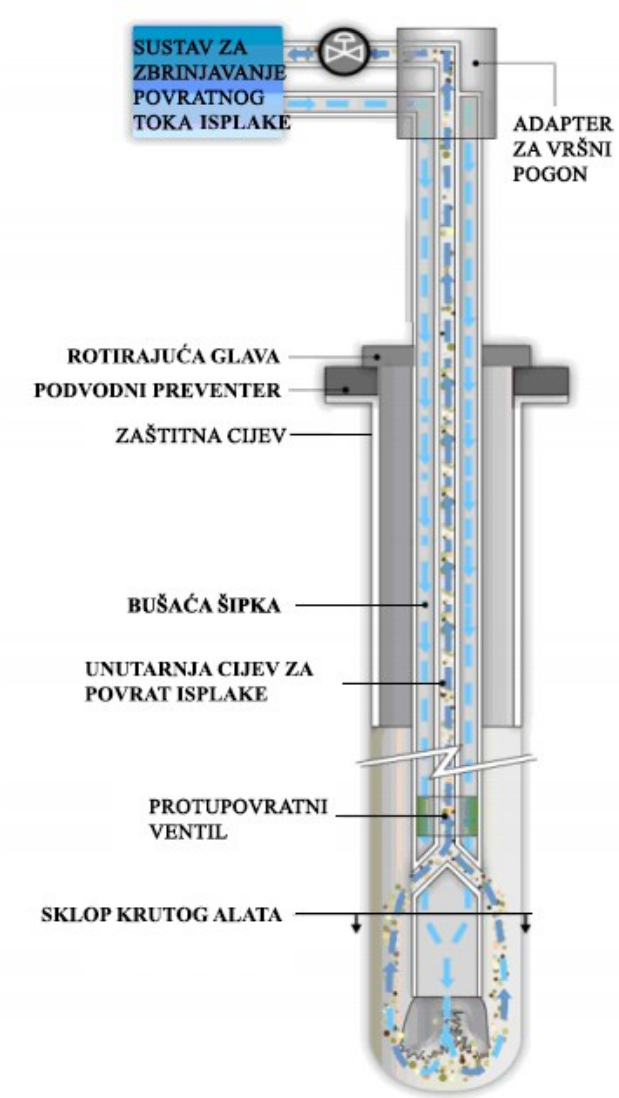


Slika 6-13. Metoda bušenja uz primjenu koncentričnog niza bušaćih šipki (Rajabi et al., 2010).

Princip rada i oprema

Sustav radi tako da se isplaka utiskuje kroz prstenasti prostor između vanjske stjenke unutarnje cijevi i unutarnje stjenke bušaće šipke. Takvo protiskivanje je omogućeno adapterom za vršni pogon (engl. *top drive adaptor,* TDA), patentiranim rotirajućim alatom koji spaja bušaće šipke sa sustavom vršnog pogona (engl. *top drive system*, TDS). Povratni tok isplake koji prolazi kroz unutarnju cijev će utjecati u sustav vršnog pogona kroz gornji ispust adaptera za vršni pogon. Povratna isplaka se tada izlijeva iz sustava vršnog pogona u kompjuterizirani razvodni sustav, koji dinamično upravlja povratnim tokom isplake i

tlakom, što ga ujedno čini pouzdanim alatom za bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka (Rajabi et al., 2010). Rad metode je prikazan na slici 6-14.



Slika 6-14. Način rada metode bušenja uz primjenu koncentričnog niza bušaćih šipki (Rajabi et al., 2010).

Tlak na dno bušotine se kontrolira i održava konstantnim tijekom bušenja ovom metodom. Preciznije vođenje računa o tlaku u bušotini može značajno smanjiti neproduktivno vrijeme. U uskim bušaćim prozorima koji se obično susreću u odobalnom području, bušenje u uvjetima konstantnog tlaka služi kako bi se dosegnuli ciljevi koji bi inače bili nedostižni. Omogućava da se uspješno izbjegnu problemi vezani uz zaglavu alata te gubitka isplake u sloj ili dotok slojnog fluida u bušotinu. Također, primjenom metode moguće je trenutno otkriti male količine dotoka slojnog fluida te kontrolirati to stanje na siguran i pouzdan način. Tlak na dno bušotine ostaje konstantan tijekom dodavanja šipki zbog uporabe dvostrukog protupovratnog ventila (engl. *dual float valve*, DFV). Dvostruki

protupovratni ventil zatvara utok i povrat fluida kada se isplačna pumpa zaustavi. Dvostruki protupovratni ventil je integrirani dio alatke za preusmjeravanje toka isplake (engl. *flow cross over tool*) koja se nalazi iznad sklopa krutog alata (BHA) i preusmjerava tok isplake koji bi inače išao iznad sklopa krutog alata u unutrašnju cijev.

Sve vezano uz bušaću glavu i podvodni preventerski sklop ostaje nepromijenjeno u odnosu na konvencionalan sustav. No, podvodni rotirajući kontrolni uređaj (RCD) mora biti instaliran na vrhu preventerskog sklopa, kako bi tijekom bušenja zatvarao prstenasti prostor. Rotirajući kontrolni uređaj omogućava brzinu rotacije od 150 min^{-1} do 200 min^{-1} i brzinu stripiranja od oko 37 m/min. Rotirajući kontrolni uređaj bi trebao raditi što duže bez prekida. Prstenaste brtve (engl. *stripper rubbers*) bi trebale omogućiti stripiranje bušaćih šipki (duljine do 9 144 m) promjera 0,1683 m (6 5/8“) s navojima do 0,2191 m (8 5/8“). Promjer rotirajućeg kontrolnog uređaja je određena nazivnim promjerom preventera, koji može biti standardnog promjera podvodnih preventera od 0,4762 m (18 ¾“) ili 0,3461 m (13 5/8“) kada je riječ o bušotinama malog promjera (engl. *slimhole drilling*) te bi također trebao izdržati moment savijanja bušaćih šipki (Rajabi et al., 2010).

7. Zaključak

U potrazi za novim nalazištima nafte i plina, pristupa se nepoznatom i negostoljubivom okolišu, područjima koja se nalaze na velikim dubinama, u nepovoljnim vremenskim uvjetima, kao što su arktička područja te područjima s uskim „bušaćim prozorom“. U takvim je područjima otežano bušenje primjenom konvencionalnih metoda. Pri bušenju u dubokom moru nailazi se na mnoge probleme kao što su potreba za plovilima velikih nosivosti i skladišnog prostora zbog upotrebe rajzer cijevi velikih promjera i težina, ugrožavanje dubokomorskog okoliša pri bušenju uvodnih kolona, uski „bušaći prozori“ te potreba za održavanjem reoloških svojstava isplake, mogućnost nastajanja hidrata zbog dubine i temperature pri kojoj se izvodi bušenje. Puknuće rajzer cijevi predstavlja veliki problem pri konvencionalnom bušenju, jer se gubi hidrostatski tlak stupca isplake koji je ostvarivao tlak na dno bušotine. No, bušenjem uz primjenu metode dvojnih gradijenta takav slučaj ne predstavlja veću prepreku budući da je tlak na bušotinskoj glavi već hidrostatski tlak stupca vode, te je tlak na dno osiguran hidrostatskim tlakom stupca otežane isplake u kanalu bušotine. Upravo iz tih razloga primjenjuju se nekonvencionalne metode. Još jedan nedostatak primjene konvencionalnih metoda bušenja je potreba za postavljanjem dodatnih kolona zaštitnih cijevi kako bi se osigurao strukturni integritet bušotine i ciljana dubina. To u konačnici znači smanjenu mogućnost proizvodnje zbog smanjenog promjera proizvodne kolone. Bušenjem uz primjenu metode dvojnih gradijenata broj kolona je manji, zbog mogućnosti upotrebe isplake veće gustoće, što u konačnici omogućava postavljanje manjeg broja zaštitnih kolona za istu dionicu bušotine te se tako omogućava očekivana buduća proizvodnja iz takvih bušotina. Na taj se način također smanjuje vrijeme potrebno za vađenje i dodavanje bušaćih šipki, zamjenu dlijeta te vrijeme potrebno za operacije cementiranja i obavljanja karotažnih mjerenja. Na temelju prednosti bušenja uz primjenu metode dvojnih gradijenata, kao što su korištenje otežane isplake pri bušenju početnih sekcija, bolja kontrola tlaka, olakšavanje samog procesa bušenja i strukturnog integriteta bušotine, razvija se metoda bušenja bez rajzer cijevi. Također zbog mogućnosti povrata bušaćeg fluida na površinu te mogućnosti njegove ponovne upotrebe u procesu bušenja moguće je korištenje otežanih isplaka koje bi u konvencionalnom procesu bušenja bile izgubljene u morskom okolišu. Zatvoren sustav optoka čini ovu metodu odličnim odabirom za osjetljiva područja u kojima se zakonski zabranjuje ispuštanje isplake. Prednosti nekonvencionalnih metoda prepoznate su od strane mnogih velikih kompanija, koje udruženim snagama pokušavaju razviti nove funkcionalne sustave pomoću kojih će biti moguće provoditi operacije u

nepovoljnim sredinama. Prednosti kao što su smanjeno neproduktivno vrijeme, smanjeno vrijeme na čekanje vremenske prognoze, povećanje bušaćeg prozora i cjelokupno smanjenje materijala potrebnih za bušenje iste dionice u usporedbi s konvencionalnim bušenjem, predstavljaju dovoljan razlog za poboljšanje i primjenu novih metoda. Nekonvencionalne metode poput bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka i bušenja u uvjetima podtlaka koriste se već duže vrijeme te su nova istraživanja usmjerena k razvijanju i poboljšavanju istih. Metoda dvojnih gradijenta morala je proći dugi put kako bi bila prihvaćena kao komercijalna. Sama metoda se dijeli na zasebne sustave od kojih svaki ima svoje prednosti, no svi za zajednički cilj imaju smanjenje vremena potrebnog za obavljanje operacija te za krajnji rezultat smanjenje kapitalnih troškova. U industriji postoji strah od novih tehnologija, on je produkt nepovjerenja u nove sustave poput podvodnih. Sam pristup i popravak istih iziskuje više napora i novaca, a početna cijena bušenja veća je od one pri konvencionalnim metodama, što može odvratiti pojedine kompanije. Kako će se industrija sve više okretati tim novim sustavima, sama početna cijena kapitalnih ulaganja će se smanjiti jer će oprema biti sve više dostupna i lakše će se nabavljati dijelovi. No, sve ima svoj tijek uhodavanja i što se više ovakvi sustavi koriste više će se pomicati iz domene nekonvencionalnih metoda u domenu konvencionalnih.

8. Literatura

1. Alford, S. E., Asko, A., Campbell, M., Aston, M. S., Kvalvaag, E. (2005): Silicate-Based Fluid, Mud Recovery System Combine to Stabilize Surface Formations of Azeri Wells, SPE/IADC Drilling Conference, 23-25 February, Amsterdam, Netherlands, SPE 92769.
2. Brown, J. D., Urvant, V. V., Thorogood, J. L., Rolland, N. L. (2007): Deployment of a Riserless Mud Recovery System Offshore Sakhalin Island, SPE/IADC Drilling Conference, 20-22 February, Amsterdam, The Netherlands, SPE/IADC 105212.
3. Carter, G., Bland, B., Pinckard, M. (2005): Riserless Drilling- Applications of an Innovative Drilling Method and Tools, Offshore Technology Conference, 2-5 May, Houston, Texas, OTC 17673.
4. Claudey, E., Maubach, C., Ferrari, S. (2016): Deepest Deployment of Riserless Dual Gradient Mud Recovery System in Drilling Operation in the North Sea, SPE Bergen One Day Seminar, 20 April, Grieghallen, Bergen, Norway, SPE- 179999-MS.
5. Choe, J., Schubert, J. J., Juvkam-Wold, H. C. (2007): Analyses and Procedures for Kick Detection in Subsea Mudlift Drilling, SPE 87114 PA.
6. Dieffenbaugher, J., Dupre, R., Authement, G., Mullen, G., Gonzalez Y., Tanche-Larsen P. B. (2005): Drilling Fluids Planning and Execution for a World Record Water Depth Well, SPE/IADC Drilling Conference, 23-25 February, Amsterdam, Netherlands, SPE-92587-MS.
7. Dowell, J. D., (2010): Deploying the World's First Commercial Dual Gradient Drilling Systems, SPE Deepwater Drilling and Completions Conference, 5-6 October, Galveston, Texas, USA, SPE 137319.
8. Johnson, M., & Rowden, M. (2001): Riserless Drilling Technique Saves Time and Money by Reducing Logistics and Maximizing Borehole Stability, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 September-3 October, New Orleans, Louisiana, SPE-71752-MS.
9. Kaasa, G., Stamnes, O., Imsland, L., & Aamo, O. (2011). Intelligent Estimation of Downhole Pressure Using a Simple Hydraulic Model, IADC/SPE Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference & Exhibition, 5-6 April, Denver, Colorado, USA, SPE 143097.
10. Kulakofsky, D., Farias, J., Troilo, A., Villa, H., Useche, L. (2006): Case History Documents Lightweight Cementing Solutions in Difficult, Managed Pressured Drilling Application, Venezuela.

11. Gaup, T. H. (2012): Simulations of Dual Gradient Drilling. Norwegian University of Science and Technology, Petroleum Engineering and Applied Geophysics. Trondheim: NTNU.
12. Geng, J., Zhou, C., Zhao, Q. (2011): Technology of Dynamic Kill Drilling for Drilling in the Superficial Layer of Deepwater, International Petroleum Technology Conference, 15-17 November, Bangkok, Thailand, IPTC-15348-MS.
13. Güyagüler, B., Papadopoulos, A., & Philpot, J. (2009). Feedback Controllers for the Simulation of Field Processes, SPE Reservoir Simulation Symposium, 2-4 February, The Woodlands, Texas, SPE 118969.
14. Halkyard, J., Anderson, M. R., Maurer, W. C. (2014): Hollow Glass Microspheres: An Option for Dual Gradient Drilling and Deep Ocean Mining Lift, Offshore Technology Conference-Asia, 25-28 March, Kuala Lumpur, Malaysia, OTC-25044-MS.
15. Herrmann, R. P., Shaughnessy, J. M. (2001): Two Methods for Achieving a Dual Gradient in Deepwater, SPE/IADC Drilling Conference, 27 February-1 March, Amsterdam, Netherlands, SPE 67745.
16. Malt, R., Stave, R., (2014): EC-Drill MPD Dual Gradient Drilling for Challenging Pressure Regimes, Offshore Technology Conference-Asia, 25-28 March, Kuala Lumpur, Malaysia, OTC-25455.
17. Nygaard, G., & Godhavn, J.-M. (2013). Automated Drilling Operations . Stavanger, Rogaland, Norway: University of Stavanger.
18. Ostroot, K., Shayegi. S., Lewis, D., Lovoren, R. (2007): Comparison and advantages of Underbalanced and Managed-Pressure Drilling Techniques, AADE National Technical Conference and Exhibition held at the Wyndam Greenspoint Hotel, Houston, Texas, April 10-12, AADE-07-NTCE-39
19. Pelletier, J. H., Ostermeier, R. M., Winker, C. D., Nicholson, J. W., Rambow, F. H. (1999): Shallow water flow sands in the deepwater Gulf of Mexico: some recent Shell experience, International Forum on Shallow Water Flows Conference, League City, TX, 6–8 Oct.
20. Peng, Q., Fan, H., Ji, R., Chen, X., Zhou, H., Liu, J., Han, F., Fu, China University of Petroleum, SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, (2016): A Simplified Method of Hydraulics Analysis for Riserless Drilling System, Offshore Technology Conference held in Houston, Texas, USA, 2–5 May.

21. Pessanha, W., Indo, M., Miranda, A. (2015): Riserless Drilling Technique for Maximizing Bore Hole Stability: Dynamic Kill Drilling Application in Offshore Brazil, OTC Brasil, 27-29 October, Rio de Janeiro, Brazil, OTC-26173-MS.
22. Rajabi, M. M., Nergaad, A. I., Hole, O., Vestavik, O. M. (2010): Riserless Reelwell Drilling Method to Adress Many Deepwater Drilling Challenges, IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, 2-4 February, New Orleans, Louisiana, USA, SPE 126148.
23. Rajabi M. M., SPE, Toftevag, K., Stave, R. S., Ziegler, R. (2012): First Application of EC-Drill in Ultra-deepwater- Proven Subsea Managed Pressure Drilling Method, SPE Deepwater Drilling and Completions Conference, 20-21 June, Galveston, Texas, USA, SPE 151100.
24. Rohani, R. M. (2011): Managed Pressure Drilling Techniques and Options for Improving Opreational Safety and Efficiency, Petroleum and Coal, ISSN 1337-7027.
25. Saeed, S., Lovorn, R., & Knudsen, K. A. (2012). Automated Drilling Systems for MPD—The Reality, IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, 6-8 March, San Diego, California, USA, SPE 151416.
26. Time, A. (2014): Dual Gradient Drilling-Simulations during connection operations. Faculty of Sciencie and Technology, University of Stavanger.
27. Schmeigel, K.:"UBD Techniques Optimize Performance", Harts E&P, October 2005.
28. Schubert, J. J., Juvkam-Wold, H. C., Choe, J., (2006): Well Control Procedures for Dual Gradient Drilling as Compared to Conventional Riser Drilling, SPE 99029 PA.
29. Schumacher, J. P., Dowell, J. D., Ribbeck, L. R, Eggmeyer, J. C. (2001): Subsea Mudlift Drilling: Planning and Preparation for the First Subsea Field Test of a Full-Scale Dual Gradient Drilling System at Green Canyon 136, Gulf of Mexico, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 September-3 October, New Orleans, Louisiana, SPE 71358.
30. Stave, R. (2014): Implementation of Dual Gradient Drilling, Offshore Technology Conference, 05-08 May, Houston, Texas, OTC-25222-MS.
31. Stave, R., Fosski, B., Endersen, C., Rezik, R. H., Tingvoll, G. I., Thorklidsen, M. (2014): Exploration Drilling with Riserless Dual Gradient Technology in Arctic Waters, OTC Arctic Technology Conference, 10-12 February, Houston, Texas, OTC 24588.
32. Smith, D., Tarr, B., Winters, W. J., Ziegler, R. F. (2010): Deepwater Riserless Mud Return System for Dual Gradient Tophole Drilling, SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition, 24-25 February, Kuala Lumpur, Malaysia, SPE-130308.

33. Smith, K. L., Gault, A. D., Witt, D. E., and Weddle, C. E. (2001) “SubSea MudLift Drilling Joint Industry, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 September-3 October, New Orleans, Louisiana, SPE 71357.
34. Urselmann, R., Cummins, J., Worall, R. N., House, G. (1999): Pressurized MudCap Drilling: Efficient Drilling of High-Pressure Fractured Reservoirs, SPE/IADC Drilling Conference, 9-11 March, Amsterdam, Netherlands, SPE 52828
35. US 4, 063, 602 Drilling Fluid Diverter System (Howell, Beck, Bruce, McLain-1976).
36. US 4, 149, 603 Riserless Mud Return System (Arnold-1977).
37. US 4, 291, 772 Drilling Fulid Bypass for Marine Riser (Beynet-1980).
38. US 4, 813, 495 Method and Apparatus for Deepwater Drilling (Leach - 1987).
39. Vestavik, O. M., Hole, O. i Brown, S. (2008): Dual Drill Pipe - A New Approach to Drilling. World Oil, 229 (10), str. 47-55.
40. Vieria, P., Arnone, M., Russel, B., Cook, I., Moyse, K., Torres, F., Qutub, H., Yuesheng, C., Qing, C. (2008): Constant Bottomhole Pressure: Managed Pressure Drilling Technique Applied in Wxploratory Well in Saudi Arabia, SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition, 28-29 January, Abu Dhabi, UAE, SPE 113679.
41. Watkins, B. J. (1969): Method and Apparatus for Balancing Subsea Internal and External Well Pressures, US patent # 3603409.
42. Ziegler, R., Sabri, M. S. A., Idris, M. R. B., Petronas; Malt, R., Stave, R., AGR EDS ORS (2013): First Successful Commercial Application of Dual Gradient Drilling in Ultra-Deepwater GOM, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 September-2 October, New Orleans, Louisiana, USA, SPE 166272.

Internetski izvori

43. Enhanced Drilling. RMR Riserless Mud Recovery.
URL 1: http://www.enhanced-drilling.com/bilder/brochure_RMR/index.html#/6-7/ (14.10.2016)
44. Halliburton. Reduce Non-Productive Time (NPT).
URL 2: http://www.halliburton.com/en-US/ps/solutions/deepwater/challenges-solutions/reduce-non-productive-time.page?node-id=hgjyd452&Topic=DeepwaterWestAfrica (23.10.2016)
45. Flowserve. Pleuger Electrical Submersible Pumps and Water-Filled Motors.

URL 3: https://www.flowserve.com/sites/default/files/2016-07/fpd-1362-ea4.pdf (15.10.2016)

46. Discflo Corporation. Disc pumps in the oil and gas industry.
    URL 4: https://discflo.com/pdf/oilflyer.pdf (15.10.2016)
47. Standard Norge. Z-015 Temporary equipment. 4.9.2012.
    URL 5: https://www.standard.no/en/sectors/energi-og-klima/petroleum/norsok-standard-categories/z-temporary-equipm/z-0153/ (18.10.2016)
48. Williamson, R. L. DNV 2.7-1 certified. 29.9.2015.
    URL 6: https://www.dnvgl.com/news/dnv-2-7-1-certified-45492 (18.10.2016)
49. National Instruments. LabVIEW Tools Network.
    URL 7: http://www.ni.com/labview-tools-network/ (20.10.2016)
50. Iris. Ullrigg Drilling and Well Centre.
    URL 8: http://www.iris.no/research/ullrigg (23.10.2016)

IZJAVA

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

Domagoj Hećimović

_____