

Automatizirana kopnena bušaća postrojenja

Lovreković, Marin

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:941639>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

AUTOMATIZIRANA KOPNENA BUŠAČA POSTROJENJA

Diplomski rad

Marin Lovreković

N242

Zagreb, 2019.

AUTOMATIZIRANA KOPNENA BUŠAĆA POSTROJENJA

MARIN LOVREKOVIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zavod za naftno inženjerstvo

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Ideja o razvoju automatiziranih bušaćih postrojenja seže još u 1960-te godine, ali zbog nedovoljno razvijene tehnologije, tada to naprosto nije bilo moguće. Danas se automatizirani sustav za bušenje nameće kao potreba radi izrade bušotina u nekonvencionalnim ležištima i ležištima na velikim dubinama s ekstremnim uvjetima temperature i tlaka. Uz to, uvođenje ovog sustava važno je zbog povećanja sigurnosti radnog osoblja, povećanja efikasnosti te u konačnici povećanju prihoda kompanija. U radu su opisane karakteristike automatiziranog postrojenja za bušenje, njegova efikasnost i ekonomske pokazatelji kod primjene postrojenja. U završnom dijelu rada, izneseni su rezultati istraživanja o mogućnostima daljnje uporabe automatiziranih bušaćih postrojenja.

Ključne riječi: automatizirano kopneno bušaće postrojenje, konvencionalno kopneno bušaće postrojenje, efikasnost bušaćeg postrojenja

Diplomski rad sadrži: 63 stranice, 31 sliku, 3 tablice, 51 referencu.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

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

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

Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF-a

Dr.sc. Lidia Hrnčević, izvanredna profesorica RGNF-a

Datum obrane: 21. veljače 2019., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

AUTOMATED ONSHORE DRILLING RIGS

Marin Lovreković

The idea of developing an automated drilling system goes back to the 1960s, but because of the underdeveloped technology it was simply not possible. Today, the automated drilling system imposes the need for drilling in unconventional reservoirs and reservoirs at high depths with extreme temperature and pressure conditions. Additionally, the introduction of this system is important for increasing the safety of staff at work, increasing efficiency and revenue of companies. The paper describes the characteristics of the automated onshore drilling rig, efficiency and economic indicators in the use of the mentioned type of drilling rig. In the final part of the paper, the results of the research on possibilities for further use of the automatic drilling rigs have been presented.

Keywords: automated onshore drilling rig, conventional onshore drilling rig,
efficiency of drilling rig

Thesis contains: 63 pages, 31 figures, 3 tables and 51 references

Original in: Croatian

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

Supervisor: PhD. Borivoje Pašić, Assistant Professor

Reviewers: PhD Borivoje Pašić, Assistant Professor

PhD Zdenko Krištafor, Full Professor

PhD Lidia Hrnčević, Associate Professor

Date of defense: February 21th, 2019, Faculty of Mining, Geology and Petroleum
Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ:

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	III
POPIS KORIŠTENIH JEDINICA S DIMENZIJAMA	IV
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA	V
1. UVOD	1
2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE KOPNENOG BUŠAĆEG POSTROJENJA	4
3. PODJELA KOPNENIH BUŠAĆIH POSTROJENJA	8
4. AUTOMATIZIRANA KOPNENA BUŠAĆA POSTROJENJA	11
4.1. Upravljačko-kontrolni sustav	13
4.2. Pogonski sustav	16
4.3 Sustav vršnog pogona	17
4.4. Dubinski motori	19
4.5. Sustav manipuliranja alatkama	19
4.5.1. Sustavi za uvlačenje alatki u toranj	20
4.5.1.1. Fiksni automatizirani sustav za uvlačenje alatki u toranj	20
4.5.1.2. Automatizirani sustav za uvlačenje alatki u toranj s podizanjem	21
4.5.1.3. Automatizirani sustav s mehaničkom rukom	22

4.5.2. Automatizirani manipulatori na bušačem tornju	23
4.5.2.1. Manipulatorska ruka za prijenos cijevnih alatki iz horizontalnog položaja u vertikalni.....	23
4.5.2.2. Automatizirana ruka za manipulaciju alatkama na podištu tornja	24
4.5.2.3. Vertikalni manipulator	26
4.5.2.4. Automatizirani hidraulički sustav za navrtanje	27
4.5.2.5. Automatizirani klinovi.....	29
4.6. Samohodni sustav za pomicanje bušačeg postrojenja na malu udaljenost.....	31
4.7. Isplačni sustav	33
5. EFIKASNOST U UPOTREBI AUTOMATIZIRANIH KOPNENIH BUŠAČIH POSTROJENJA.....	37
5.1. Efikasnost pogonskih motora	40
5.2. Efikasnost dubinskih motora	41
5.3. Efikasnost sustava za manipulaciju.....	41
5.4. Efikasnost sustava za uvlačenje alatki u toranj.....	42
5.5. Efikasnost sustava za pripremu isplake	43
5.6. Primjeri povećanja efikasnosti automatiziranih kopnenih bušačih postrojenja.....	44
6. EKONOMSKI POKAZATELJI PRIMJENE AUTOMATIZIRANIH BUŠAČIH POSTROJENJA.....	49
6.1. Usporedba uporabe automatiziranih i konvencionalnih postrojenja u procesu bušenja ..	49
6.2. Cijena postrojenja i rada postrojenja.....	53
7. PRIMJENA AUTOMATIZIRANIH BUŠAČIH POSTROJENJA U BUDUĆNOSTI	56

8. ZAKLJUČAK	57
9. LITERATURA.....	58

POPIS SLIKA

Slika 1-1. Toranj za bušenje Edwina L. Drakea.....	2
Slika 2-1. Prikaz djelovanja postrojenja za bušenje pomoću triju komponenata.....	5
Slika 3-1. Podjela bušaćih postrojenja.....	8
Slika 3-2. Podizanje preklopnog tornja kopnenog bušaćeg postrojenja.....	9
Slika 3-3. Teleskopski toranj.....	10
Slika 4-1. Moderni kontrolno-upravljački sustav PRECISE™.....	14
Slika 4-2. Automatizirani sustav za uvlačenje s podizanjem s dvije pomoćne ruke.....	21
Slika 4-3. Automatizirani sustav s mehaničkom rukom Terra Invader 350.....	22
Slika 4-4. DRILLMEC THV 7700 daljinski upravljani sustav za podizanje alatki.....	23
Slika 4-5. HTV manipulatorska ruka tvrtke TSC.....	24
Slika 4-6. DFMA manipulatorska ruka UHT 1 200 tvrtke NOV.....	25
Slika 4-7. Vertikalni manipulator tvrtke Aker Solutions.....	27
Slika 4-8. AR-3200 automatizirani hidraulički sustav za navrtanje tvrtke NOV.....	28
Slika 4-9. Bokocrt pneumatskog sustava klinova PS-16.....	29
Slika 4-10. Sustav automatiziranih klinova s okvirom.....	30
Slika 4-11. Samohodni sustav za preseljenje bušaćeg postrojenja na malu udaljenost tvrtke Patterson- UTI	32
Slika 4-12. Uređaj BaraLogix® DRU.....	36
Slika 5-1. Efikasnost bušaćeg postrojenja iskazana u odnosu na broj izbušenih metara i stupanj iskoristivosti bušaćeg postrojenja.....	38
Slika 5-2. Efikasnost postrojenja iskazana u odnosu broja bušotina po bušaćem postrojenju u vremenskom razdoblju od 1950. godine do 2010. godine.....	39
Slika 5-3. Povećanje rezervi plina i nafte po bušaćem postrojenju u razdoblju od 1988. godine do 2008. godine.....	40
Slika 5-4. Usporedba rada iskusnog osoblja i sustava automatizirane kontrole manipulacije bušaćim alatima i opremom u procesu manipulacije alatima.....	42
Slika 5-5. Vrijeme potrebno za pripremu isplake obzirom na razinu automatizacije sustava	

za pripremu isplake.....	44
Slika 5-6. Prikaz odnosa ukupne izbušene duljine kanala bušotine i broja dana za šest bušotina izbušenih primjenom sustava automatiziranog bušačkog postrojenja tijekom pokusa izvedenog od tvrtke ConocoPhillips i tvrtke NOV.....	45
Slika 5-7. Usporedba rada automatiziranog bušačkog postrojenja HH-200 i konvencionalnog postrojenja.....	46
Slika 5-8. Bušenje bez i uz primjenu sustava HELB- Automatic Driller™.....	47
Slika 5-9. Usporedba uvjeta kontrole niza bušačkog alata bez (a) i s upotrebom sustava za sprječavanje povratne rotacije niz bušačkih alatki (b).....	48
Slika 6-1. Cijena plina u odnosu na pridobivene količine plina iz ležišta na kojem su bušotine izrađene primjenom konvencionalnih, odnosno automatiziranih bušačkih postrojenja.....	50
Slika 6-2. Odnos točke pokrića o smanjenju kapitalnih ulaganja ovisno o primjeni konvencionalnog, odnosno automatiziranog bušačkog postrojenja u različitim vrstama ležišta, prije početka komercijalnog pridobivanja plina	51
Slika 6-3. Odnos točke pokrića o smanjenju kapitala ovisno o primjeni konvencionalnog, odnosno automatiziranog bušačkog postrojenja u različitim vrstama ležišta u zreloj fazi eksploatacije.....	52
Slika 6-4. Odnos kapitalne efikasnosti i smanjenja kapitalnih ulaganja u bušotinu na primjeru različitih ležišta bušena konvencionalnim, odnosno automatiziranim bušačim postrojenjima	53
Slika 7-1. Prednosti korištenja automatiziranih bušačkih postrojenja.....	56

POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Usporedba snage pogonskih sustava ovisno o dubini bušenja.....	16
Tablica 6-1. Cijena rada kopnenog bušačkog postrojenja u SAD-u.....	54
Tablica 6-2. Cijena rada kopnenog bušačkog postrojenja na Bliskom istoku.....	54

POPIS KORIŠTENIH JEDINICA S DIMENZIJAMA

Oznaka	Jedinica	Opis
F	MN	silā
v	m/s	brzina
P	kW	snaga
L	m	duljina
α	°	kut
p	bar	tlak
M _t	Nm	moment torzije
m	t	masa
m	kg	masa
m	mg	masa
t	°C	temperatura
ω	o/min	kutna brzina
q	m ³ /min	protok
ρ	kg/m ³	gustoća
V	m ³	volumen
t	min	vrijeme

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

Oznaka	Značenje
CCTV	analogno (engl. <i>Closed Circuit Television</i>)
DFMA	automatizirana ruka za manipulaciju alatkama na podištu tornja (engl. <i>Drillflor Manipulator Arm</i>)
DRU	reološke veličine i veličine gustoće (engl. <i>Density and Rheology Unit</i>)
DYNAAMO	težno-ekonomski model za kvantitativnu procjenu utjecaja nižih troškova bušenja na plinsku industriju (engl. <i>Dynamic Upstream Gas Model</i>)
LAN	lokalna računalna mreža (engl. <i>Local Area Network</i>)
mil.	milijun
mlrd.	milijarda
MPI	komunikacijski protokol (engl. <i>Message Passing Interface</i>)
PLC	programibilni logički kontroler (eng. <i>Programmable Logic Controller</i>)
PPI	komunikacijski protokol (engl. <i>Process Planning Interface</i>)
PROFIBUS	komunikacijski protokol u procesu automatizacije (engl. <i>Process Field Bus</i>)
RMS	efektivna vrijednost vibracije (engl. <i>Root Mean Square</i>)
SAD	Sjedinjene Američke Države
SCADA	sistem daljinskog nadzora i upravljanja (engl. <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>)
USD	američki dolar (engl. <i>U.S. dollar</i>)
VPN	virtualna privatna mreža (engl. <i>Virtual Private Network</i>)
VPH	vertikalni manipulator (engl. <i>Vertical Pipe Handling System</i>)
WTI	vrsta nafte koja se pridobiva u Meksičkom zaljevu. Ujedno je naftni marker.(engl. <i>West Texas Intermediate</i>)

1. UVOD

Još od davnine, razvijene su različite tehnike bušenja s ciljem pridobivanja nafte i vode. Već je 347. godine prije Krista u Kini izbušena bušotina udarnom metodom u ležištu slane vode, dubine 240 metara, svrdlom pričvršćenim na bambus. Metoda udarnog bušenja podrazumijeva udaranje svrdla težinom opreme za bušenje u stijenu pri čemu dolazi do odlamanja komada stijene. Nakon svakog udarca, dlijeto se zaokreće i postupak udaranja se ponavlja. Također, pronađeni su zapisi iz 1594. godine o iskopima bušotina u ležištu nafte u Bakuu u Perziji, na dubini od 35 metara. Edwin L. Drake izbušio je 1859. godine prvu komercijalnu bušotinu dubine 21 metar u SAD-u koristeći udarnu metodu, pri čemu je korišten parni stroj za ostvarivanje udarca dlijeta u stijenu (Sjvgeology, 2014).

Na slici 1-1. prikazan je drveni toranj za bušenje Edwina L. Drakea. Udarno bušenje korišteno je tijekom povijesti za bušenje ležišta nafte i vode u Aziji, Europi i SAD-u. Danas se udarna metoda rijetko koristi i jedina joj je namjena pri izradi zdenaca u plitkim ležištima vode. Druga metoda bušenja je rotacijska metoda. U upotrebu ju je uveo Englez Robert Beart 1844. godine. Za ovu metodu karakteristična je rotacija dlijeta i bušačih alatki, čime se postiže bolji učinak razrušavanja stijene od udarne metode bušenja. Pioniri u upotrebi ove metode za izradu bušotina za crpljenje nafte su braća Baker. 1894. godine, izbušili su prve bušotine u ležištu nafte na polju Corsicana u Texasu, koristeći opremu pogonjenu radom mula. Rotacijska metoda je u komercijalnoj upotrebi u SAD-u od početka 20. stoljeća u Texasu i Pennsylvaniji, a danas se koristi u svim operacijama izrade bušotina za crpljenje nafte, plina, ali i vode u cijelom svijetu (Nationaldriller, 2014).

To je bio tek početak u razvoju opreme i daljnjeg usavršavanja metode bušenja. Tijekom vremena, u upotrebu su ulazile razne novine; od dijamantnih dlijeta, iznošenje čestica iz kanala bušotine optokom isplake pa sve do današnjih dana, kada su u upotrebi automatizirani uređaji i računalni programi koji omogućuju obavljanje složenijih i kompleksnijih operacija u procesu izrade bušotina.



Slika 1-1. Toranj za bušenje Edwina L. Drakea (Britannica, 2015)

U diplomskom radu obrađena je tema različitih sustava automatizacije u procesu bušenja. U prvom dijelu rada navedena je podjela bušaćih postrojenja i opisane su osnovne značajke automatiziranog bušaćeg postrojenja. U drugom dijelu provedena je analiza efikasnosti i ekonomičnosti uporabe automatiziranih bušaćih postrojenja. Na samom kraju rada, prikazani su rezultati istraživanja o budućem razvoju i primjeni automatiziranih bušaćih postrojenja.

2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE KOPNENOG BUŠAĆEG POSTROJENJA

Namjena bušaćeg postrojenja je bušenje bušotina s ciljem pridobivanja nafte i plina, kao i za pridobivanje čvrstih mineralnih sirovina, termalnih voda i voda za konzumaciju. Karakterizirano je velikom mobilnošću, odnosno mogućnošću lakog i brzog premještanja s jedne lokacije na drugu. Obzirom na djelovanje na stjensku masu, proces bušenja dijeli se na (Matanović, 2007):

- mehaničko bušenje i
- fizičko bušenje.

Mehaničko bušenje temelji se na razaranju, rezanju i drobljenju stijene. Ostvaruje se rotacijom dlijeta na dnu bušaćeg niza i djelovanjem sile ostvarene težinom. Mehaničko bušenje je najkorišteniji način bušenja i dijeli se na tri vrste:

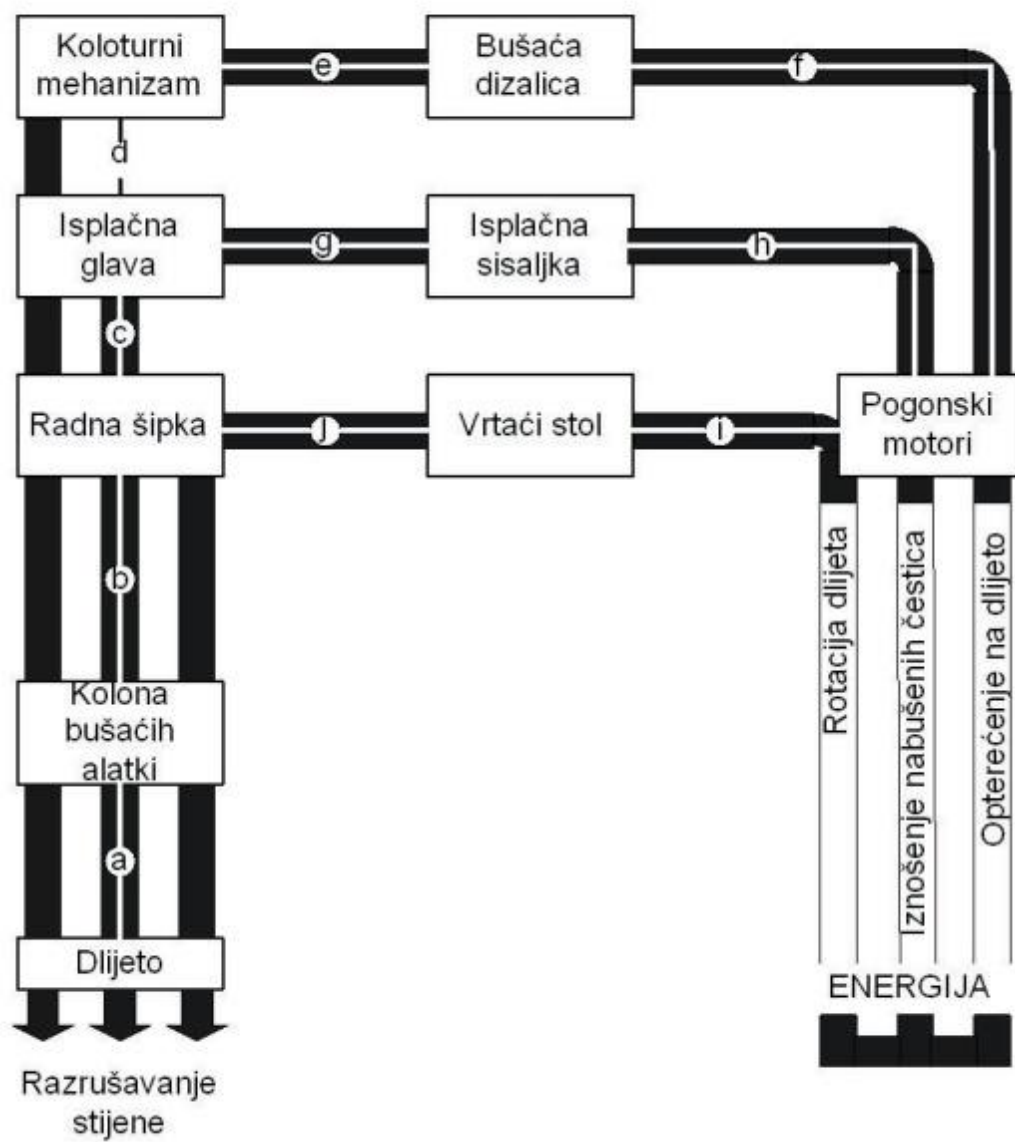
- udarno;
- rotacijsko i
- udarno-rotacijsko bušenje.

Udarno bušenje rijetko se koristi i uglavnom je upotreba ograničena na plića ležišta vode, dok je rotacijsko bušenje danas najkorištenija metoda bušenja. Da bi se ostvario napredak u bušenju, potrebno je istovremeno ostvariti (Matanović, 2007):

- okretanje alatke za razrušavanje;
- opterećenje na dlijeto i
- uklanjanje razrušenih čestica s dna bušotine i uspostavljanje kontakta dlijeta s nerazrušenom stijenom.

S obzirom da je za uspješan proces bušenja potrebno ostvariti zadovoljenje sva tri spomenuta uvjeta, djelovanje postrojenja za bušenje podijeljeno je na tri sustava (slika 2-1.) i to za:

- rotaciju dlijeta;
- ispiranje i iznošenje nabušenih krhotina i
- ostvarenje opterećenja na dlijeto.



Slika 2-1. Prikaz djelovanja postrojenja za bušenje kroz tri osnovna sustava (Matanović, 2007)

Rotacija dlijeta ostvaruje se na tri načina:

- vrtaćim stolom;
- vršnim pogonom i
- dubinskim motorom.

Fizičke metode bušenja još su u fazi razvoja i ne upotrebljavaju se u komercijalne svrhe, i dijele se na termičke, elektrofizičke, ultrazvučne i upotrebu plazme. Za sve njih je karakteristično da prilikom bušenja alatke nisu u kontaktu sa stijenama (Rgf, 2013).

Svako postrojenje dimenzionirano je obzirom na namjenu koja je određena karakteristikama bušačkog postrojenja:

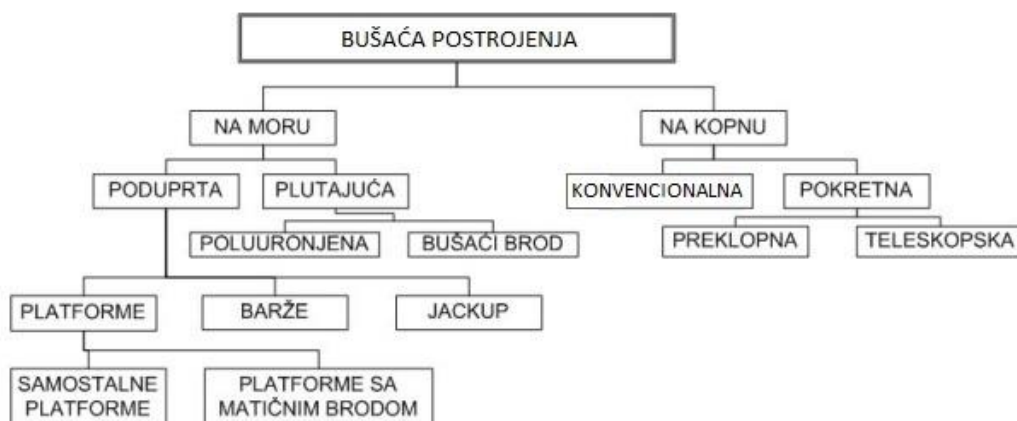
- nosivost tornja (opterećenje na kuki);
- snaga bušačkog postrojenja;
- radni tlak i dobava isplačnih sisaljki;
- dubina bušenja;
- brzina vrtnje vrtaćeg stola ili dlijeta i
- dimenzije tornja i podstrukture.

Nosivost konvencionalnog tornja je onaj teret koji toranj smije nositi na kruni uz faktor sigurnosti i uvjet da su sve četiri noge jednako opterećene, u tornju nema bušačkih alatki i na toranj ne djeluju sile vjetre. Pri tome, masa tornja nije uzeta u obzir (Matanović, 2007). Toranj je čelična rešetkasta konstrukcija na koju je ovješena koloturna sustav i kuka, te bušaće alatke tijekom postupka manevriranja bušačkog alata i samog bušenja. Ispod tornja nalazi se podstruktura tornja koja preuzima opterećenje ostvareno težinom tornja, bušačkih alatki koje se koriste tijekom bušenja, ali i alatki koje se nalaze na podištu tornja, odnosno unutar ili izvan strukture tornja (alatke odložene tijekom manevra). Standardni tornjevi mogu biti opterećeni alatkama težine od 1 MN do 7 MN, te izdržati udare vjetrova od 45 m/s do 60 m/s kada se na odlagalištu unutar tornja nalaze alatke bez upotrebe zateznih užeta. Također, toranj mora biti konstruiran da može podnijeti dvostruko veća opterećenja od predviđenih. Nominalna nosivost definirana je kao najveća težina bušačkih alatki pri čemu je omogućen normalan rad postrojenja. Maksimalna nosivost predstavlja nosivost tornja koje toranj može podnijeti pri kratkotrajnom opterećenju. Vrijednost maksimalne nosivosti je 20% do 30% veća od nominalne nosivosti. Snaga bušačkog postrojenja je sposobnost spuštanja i dizanja bušačkog alataka određenom brzinom. Na temelju potrebne snage postrojenja definiraju se elementi potrebne trajnosti i čvrstoće kao što su struktura i podstruktura postrojenja, spojnice, motori prijenosnici, itd. Ovisno o visini tornja bušačkog postrojenja, definirana je duljina cijevnog alata kojim se može manipulirati tijekom manevra. Tako postoje postrojenja

s dodavanjem jedne cijevi pa sve do postrojenja gdje se prilikom dodavanja može dodati pas cijevi od 27 metara. Da bi se omogućilo bušenje, potrebno je imati ispladne sisaljke potrebne dobave i radnog tlaka. Potrebna dobava i radni tlak ispladne sisaljke određuju se ovisno o dubini bušenja, naslagama kroz koje se buši, geološkim i ostalim faktorima bitnim za proces bušenja. Tako se za ispladni sustav definira maksimalni radni tlak koji predstavlja maksimalni tlak pri kojemu je moguće dugotrajno obavljati proces iznošenja nabušenih čestica (Matanović, 2007).

3. PODJELA KOPNENIH BUŠAĆIH POSTROJENJA

Danas postoji veliki izbor bušaćih postrojenja koje se konstruiraju obzirom na namjenu, vremenske uvjete, dubinu bušenja i mobilnost.

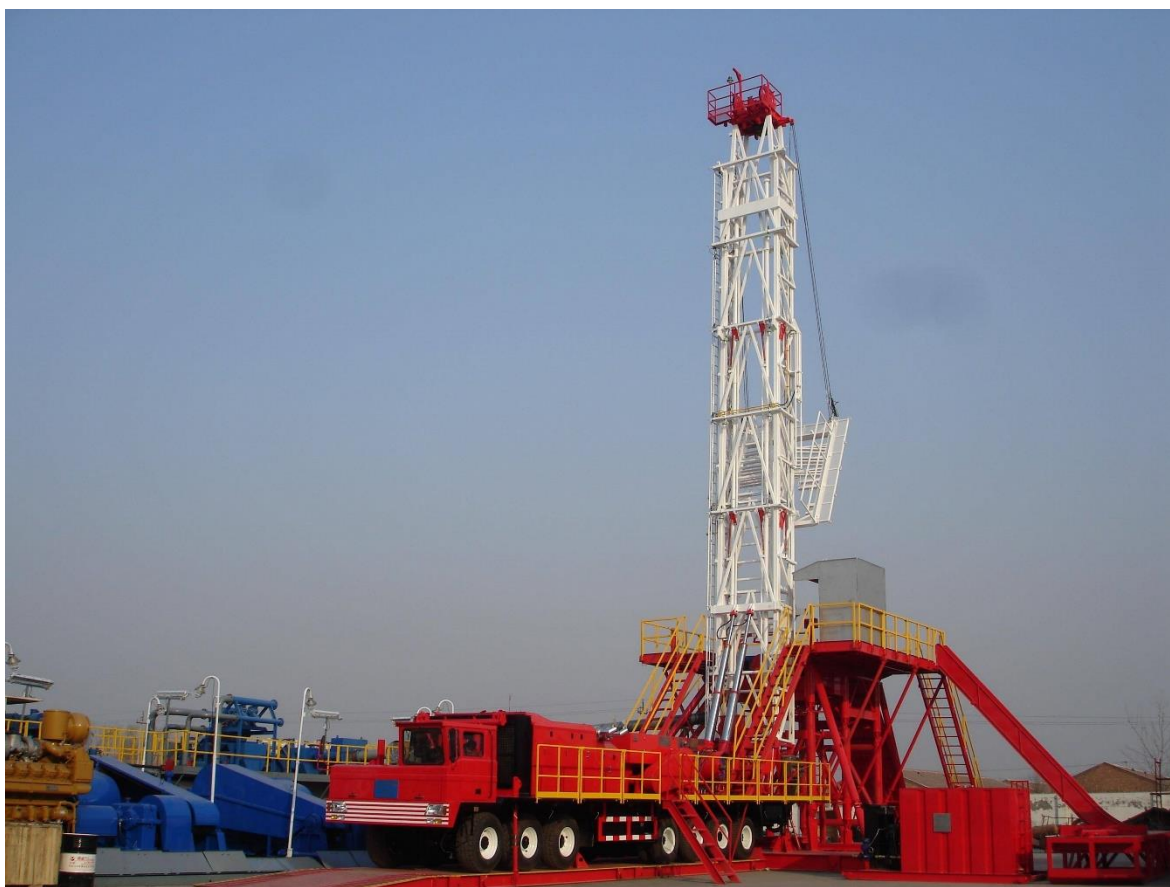


Slika 3-1. Podjela bušaćih postrojenja (Petoil, 2012)

Prema slici 3-1., bušaća postrojenja dijele se na postrojenja za rad na moru i postrojenja za rad na kopnu. Kopnena postrojenja dijele se, ovisno o vrsti tornja i mobilnosti, na konvencionalna (engl. *conventional*) i pokretna (engl. *mobile*) postrojenja, a pokretna postrojenja dalje na postrojenja s preklopnim tornjem (engl. *jack-knife*) i postrojenja s teleskopskim tornjem (engl. *portable mast*). Konvencionalna postrojenja sastavljaju se od segmenata u uspravnom stanju. Na slici 3-2. prikazano je kopneno bušaće postrojenje s preklopnim tornjem, koji se sastavlja na tlu i pomoću hidrauličkog sklopa ili dizalice podiže u vertikalni položaj. Za teleskopska postrojenja, prikazano na slici 3-3., karakteristično je da se koriste za pliće bušotine i nalaze se na kamionima i prikolicama zajedno s motorom i sustavom za podizanje tornja u uspravni položaj. Podizanje tornja ostvaruje se hidrauličkim klipovima.



Slika 3-2. Podizanje preklopnog tornja kopnenog bušaćeg postrojenja (Citadel, 2014)



Slika 3-3. Teleskopski toranj (Dayang, 2018)

4. AUTOMATIZIRANA KOPNENA BUŠAĆA POSTROJENJA

U samim počecima razvoja bušaćih postrojenja, glavni izvor pogonske snage postrojenja bio je ljudski i životinjski rad. Tijekom vremena, koncept bušaćeg postrojenja doživio je preinake, od stvaranja mehaniziranog bušaćeg postrojenja, poluautomatiziranog postrojenja i u novije doba razvoja potpuno automatiziranog bušaćeg postrojenja. Razvijanje procesa bušenja kakvog danas poznajemo, započeo je još 1860-ih kada je Rodolphe Leschot razvio sustav bušenja s upotrebom dlijeta za bušenje tunela. Sustav se sastojao od cilindra gdje je kretnja klipa s klipnjačom uzrokovala opterećenje i rotaciju dlijeta. Rad na cilindar bio je prenošen vodenom pumpom pogonjenom parnim strojem. S vremenom je došlo do usavršavanja bušaćeg postrojenja uvođenjem kontinuiranog rotacijskog bušenja, sustava za optok isplake, motora s unutrašnjim izgaranjem, itd. Iako se nastoji uvesti automatizirana postrojenja u široku komercijalnu uporabu, to još nije zaživjelo, ponajviše zbog smanjenih prihoda i potrebnih restrukturiranja u kompanijama čiji je razlog niska cijena barela nafte koja je početkom 2019. godine iznosila 60,87 USD za naftni marker Brent, odnosno 51,6 USD za naftni marker WTI (Oil Price, 2019).

No, potrebe za komercijalnim uvođenjem automatiziranog bušaćeg postrojenja su velike i proizlaze iz sljedećih razloga (Eustes, 2007):

- automatiziranjem rada bušaćeg postrojenja, povećat će se sigurnost u radu kao rezultat rada ljudi van opasnih zona postrojenja koja uključuju direktno rukovanje sa strojevima i ostalim alatkama;
- smanjenje broja radne snage na postrojenju povećat će sigurnost, pouzdanost u radu i smanjenje troškova za plaće i razne druge izdatke za zaposlene;
- omogućavanje rada u teškim vremenskim uvjetima. Opće je poznato da ljudski organizam ima slabiju reakciju, kao i djelovanje pri veoma hladnim i vrućim vremenskim uvjetima, u uvjetima jakih vjetrova i drugih nepogoda, što uzrokuje greške u radu i smanjenu djelotvornost procesa bušenja;
- optimiziranje opterećenja na dlijeto i broja okretaja dlijeta;

- spuštanje i podizanje alata može biti puno efikasnije, brže i sigurnije, a nastanak hidrauličkog udara i klipovanja smanjit će se na najmanju moguću mjeru;
- mogućnost obavljanja kompleksnijih operacija;
- smanjenje dimenzija postrojenja što će imati manji utjecaj na okoliš, te će biti lakše transportirati i postaviti u radni položaj;
- povećava se preciznost i točnost obavljanja određenih operacija. Izbjegavaju se opasne situacije uzrokovane ljudskim nemarom i greškama;
- najvažniji razlog je smanjenje operativnih troškova rada postrojenja.

U procesu automatizacije bušačkih postrojenja sudjelovale su mnogobrojne tvrtke, razvojem sustava za manipulaciju bušačim alatkama i sustava bušenja. Planovi o potpunoj automatizaciji bušačkog postrojenja sežu još u 1940-e godine kada su razvijeni planovi i nacrti za razvoj postrojenja s hidrauličkim elevatorom i sustavom hidrauličkih cilindara. Tvrtka Byron Jackson Company je 1945. godine uvela u upotrebu pneumatske klinove, a 1949. godine konstruirala prototip sustava za odlaganje bušačkih šipki (engl. *racking system*) u tornju u uspravnom položaju i njihovo centriranje prilikom dodavanja novog pasa alatki za bušenje. 1950-ih godina, na bušaće brodove uveden je automatizirani sustav za odlaganje bušačkih šipki u tornju, sustav isplačne glave i vrtači stol. Tvrtka Varco uvela je 1975. godine u upotrebu mehanizirani sustav za navrtanje bušačkih šipki. Ozbiljniji procesi automatizacije postrojenja započeli su 1980-ih uvođenjem vršnog pogona u komercijalnu upotrebu. Najpoznatiji proizvođači kopnenih bušačkih postrojenja su Helmerich and Payne s Flex serijom bušačkih postrojenja i Nabors s PACE postrojenjem za bušenje. No, da bi se na postrojenju mogle obavljati automatizirane operacije, uveden je računalni sustav sa sustavom senzora. Tvrtka Schlumberger je 2004. godine, u suradnji s M/D Totcom, pokrenula projekt daljinskog upravljanja postrojenjem za bušenje (Eustes, 2007). Danas postoje dva osnovna pristupa u procesu automatizacije bušačkih postrojenja. Prvi princip podrazumijeva nadogradnju postojećeg bušačkog postrojenja ugradnjom potrebnih automatiziranih uređaja kako što su sustav vršnog pogona, automatizirani sustav manipuliranja alatkama, itd. Drugi princip podrazumijeva kupovinu potpuno novog automatiziranog bušačkog postrojenja. Ovakvo postrojenje posjeduje upravljačku konzolu

kojom upravlja bušač. Uz to, na postrojenju se nalazi jedan, odnosno dva člana osoblja za održavanje postrojenja, odnosno podršku. Potpuno automatizirana postrojenja obično su isplativija, lakša, manja i lakša za upravljanje od konvencionalnih postrojenja koja su nadograđena automatiziranom opremom (OGJ, 2015).

Primjena automatiziranih bušaćih postrojenja ima mnogo prednosti, od kojih su najvažnije:

- smanjenje troškova;
- povećanje produktivnosti;
- povećanje mogućnosti pohrane podataka o bušenju;
- povećanje pouzdanosti i
- povećanje mogućnosti postrojenja.

Obzirom da zaposlenje velikog broja osoblja na bušaćim postrojenjima donosi znatne izdatke, automatizacijom bušaćeg postrojenja došlo je do smanjenja broja potrebnog ljudstva. Prema istraživanjima, troškovi koji se odnose na ljudstvo mogu doseći udio u ukupnim troškovima bušenja do 71%. Upotrebom automatiziranih bušaćih postrojenja smanjeni su troškovi bušenja za 30%. Smanjenjem zastoja u radu postrojenja zbog kvarova, manipuliranja alatkama i ostalih procesa, povećana je produktivnost bušaćeg postrojenja za 27%. Također, razvojem uređaja i alatki i uvođenjem daljinskog nadzora i upravljanja povećana je mogućnost pohrane podataka o bušenju za 25%, pouzdanost za 14%, dok su tehničke mogućnosti postrojenja porasle za 4% (Helpsystem, 2018).

Princip rada postrojenja s automatiziranim sustavom bušenja identičan je sustavu bušenja na konvencionalnim bušaćim postrojenjem. Glavna razlika je što je na automatiziranim postrojenjima za bušenje implementiran sustav nadzora i upravljanja koji omogućuje izvođenje operacija s jednog mjesta računalnim sustavom i potpunu automatizaciju procesa.

4.1. Upravljačko-kontrolni sustav

U modernim postrojenjima sa sustavom automatiziranog bušenja, upravljanje i nadzor operacija obavlja se iz suvremene bušaće kabine, gdje bušač, sjedeći na bušaćoj stolici (engl. *cyber chair*), obavlja operacije komandnim ručicama (engl. *joystick*) i računalnim zaslonima,

osjetljivima na dodir, s prikazom parametara bušenja. Na slici 4-1. prikazan je sustav za upravljanje procesom bušenja PRECISE™ tvrtke Omron.



Slika 4-1. Moderni kontrolno-upravljački sustav PRECISE™ (Omron, 2014a)

Prikazani sustav sadrži dvije komandne ručice, četiri zaslona, sigurnosne sklopke i ostale komande. Komandnim ručicama upravlja se sustavom vršnog pogona, elevatorom, sustavom za dodavanje alatki, kao i sustavom za navrtanje bušačkih šipki. Također, bušač upravlja sustavom dizalice, preventerskim sklopom, automatiziranim klinovima, isplachnim pumpama i ostalim sustavima postrojenja. Na zaslonima bušač ima uvid u tijek same operacije i rad pojedinih uređaja. Nadzor i praćenje operacijama omogućen je zahvaljujući SCADA (engl. *Supervisory Control and Data Acquisition*) programskoj podršci. SCADA omogućuje nadzor, uvid i upravljanje operacijama i procesima, kao i pohranu podataka, a komunikacija se odvija pomoću protokola kao što su serial port, MPI, PPI, itd. Sučelje se sastoji od sheme cijelog procesnog dijela, s dijelovima postrojenja i vrijednostima tlaka, temperature i ostalih parametara. Sustav se sastoji od nekoliko modula, koji se generalno dijele na (Gupta, 2006):

- sustav nadzora nad procesom bušenja;

- sustav za bilježenje i pohranjivanje podataka vezanih u operacije bušenja;
- sustav za bilježenje i pohranjivanje podataka vezanih u operacije manipulacije alatkama i
- alarmnog sustava.

Sustav nudi uvid u visinski položaj kuke, brzinu kretanja sustava za manipuliranje, gornju i donju radnu visinu kuke, opterećenje na kuki i dlijetu, rad ispravljača i generatora, trenutni položaj klinova, moment torzije, broj okretaja dlijeta i grafički prikaz napretka bušenja. Uz ostalo, tu se nalazi i prikaz virtualnog indikatora težine, rada isplućnih pumpi, vršnog pogona, pogonskog sustava, alarmnog sustava, sustava održavanja i ostalih uređaja na postrojenju, itd. Također, postoji i vizualni nadzor postrojenja koji se snima CCTV (engl. *Closed Circuit Television*) kamerama što uvelike olakšava rad. Sustav sadrži priručnike za rad, kao i mogućnost rada u metričkom i angloameričkom sustavu mjera (Omron, 2014b).

Da bi se ostvarila mogućnost kontrole radom navedenih sustava i uređaja, na dizalici, vršnom pogonu, isplućnim pumpama i ostalim dijelovima bušačkog postrojenja postavljen je sustav senzora koji putem LAN (engl. *Local Area Network*) mreže komunicira sa središnjim upravljačko-kontrolnim sustavom. U ormariću upravljačko-kontrolnog sustava nalaze se (Omron, 2014a):

- programibilni logički kontroler (PLC- eng. *Programmable Logic Controller*) koji se sastoje od procesora, memorije, ulaza i izlaza što podrazumijeva tipkala i sklopke, odnosno senzore i pretvornike;
- sustav za pohranu podataka;
- komunikacijski sustav;
- sustav za prijenos podataka i
- mrežni uređaji.

Prijenos signala s postavljenih senzora na radnim sustavima bušačkog postrojenja do programibilnog logičkog kontrolera najčešće se prenosi PROFIBUS (engl. *Process Field Bus*) protokolom i zatim se ethernetom preko preklopnika prenose informacije do kontrolno-upravljačkog sustava. Podaci se pohranjuju u data loggeru i šalju VPN (engl. *Virtual Private*

Network) mrežom do središnjih kontrolnih centara. Kontrolni centri služe za daljinski nadzor rada bušačkih postrojenja i analizu podataka. Daljinski nadzor ima mnoge prednosti; od toga da stručno osoblje u centrima može na vrijeme predvidjeti neispravnosti i potencijalne kvarove na postrojenju, čime se sprječavaju incidenti, do otkrivanja kvarova koje ne može otkriti osoblje na postrojenju ili uočavanje kvarova bez fizičke prisutnosti osoblja na postrojenju. Sve to dovodi do uštede vremena, novaca, smanjenja kvarova i ozljeda (Levett, 2004).

4.2. Pogonski sustav

Pogonski sustav klasičnih kopnenih bušačkih postrojenja najčešće se temelji na uporabi motora s unutrašnjim izgaranjem. Snaga pogonskih motora kreće se od 370 kW do 4 000 kW. Prijenos snage može se ostvariti mehaničkim, električnim i mehaničko-električnim načinom transmisije. U prošlosti se uvelike koristio mehanički način prijenosa gdje se prijenos energije do dizalica, isplućnih sisaljki i ostalih uređaja prenosio sustavom lančanika, lanaca, vratila, spojki što je usložnjavalo proces prijenosa energije i snage motora zbog potrebe za složenim sklopom uređaja za transmisiju. Danas se mehanički sustav prijenosa uglavnom koristi na postrojenjima montiranim na kamione i prikolice. Mehanička transmisija predstavlja najjeftiniji, ali i najneučinkovitiji primjer transmisije. Uvođenjem električnog načina transmisije, pojednostavio se proces prijenosa. Diesel motori pogone generator istosmjerne ili izmjenične struje. Prijenos električne energije ostvaruje se električnim vodovima do razvodnih uređaja i sklopki, a zatim do elektromotora koji pogone osovine isplućnih sisaljki, dizalica, mosura, itd. Električni način transmisije predstavlja fleksibilniji i sigurniji sustav zbog jednostavnosti kontrole sustava pomoću računala, čime se postiže bolja kontrola opterećenja na dlijeto, brzine rotacije dlijeta i momenta torzije, velika snaga pri malim brzinama te optimalna potrošnja energije čak i pri velikim opterećenjima. Iako je električna transmisija najpouzdaniji i najsigurniji način prijenosa energije, ujedno je i najskuplji načina prijenosa. Elektro-mehanička transmisija najčešće se koristi na mobilnim postrojenjima. Dizalica i vrtači stol pogone se mehanički, dok su vršni pogon i isplućne pumpe pogonjeni električnom transmisijom. Ovaj način je jeftiniji od električnog načina transmisije (Sovonex, 2012).

Ovisno o potrebnoj dubini bušenja i pogonjenim uređajima, koriste se pogonski sustavi različitih snaga. Tako se, prema tablici 4-1., za dubine manje od 2 000 metara koristi pogonski sustav snage 1 200 kW, dok se za ekstremne dubine od 5 000 do 7 000 metara koriste pogonski sustavi snage čak 4 000 kW.

Tablica 4-1. Usporedba snage pogonskih sustava ovisno o dubini bušenja (Siemens, 2006)

Pogonska snaga (kW)	Dubina (m)	
1 200	< 2 000	
1 500	2 000	3 000
2 400	3 000	5 000
4 000	5 000	7 000

4.3 Sustav vršnog pogona

Tijekom prošlosti, a i na velikom broju kopnenih postrojenja danas koristi se sustav vrtaćeg stola. Vrtaći stol služi za rotaciju bušaćih alatki i za uklinjenje i preuzimanje težine alatki prilikom manipulacija alatkama unutar tornja. Sustav vrtaćeg stola sastoji se od vrtaćeg stola i kupole vrtaćeg stola. Vrtaći stol sastoji se od sustava aksijalnih, protuaksijalnih, radijalnih ležajeva, brtvila, osovine i sustava planetarnih zupčanika kojima se ostvaruje rotacija alatki. Unutar otvora vrtaćeg stola postavlja se kupola vrtaćeg stola koja povezuje kupolu radne šipke i vrtaći stol. Postoje dva načina pogona kupole vrtaćeg stola: kvadratični pogon i pogon zaticima. Prilikom odsjedanja bušaćih alatki u vrtaći stol, u otvor vrtaćeg stola stavljaju se klinovi koji podržavaju bušace alatke. Navrtanje navoja bušaćih alatki obavlja se lancima ili užem od konoplje koja su povezana s mosurama i kojima se ostvaruje primarno dotezanje. Sekundarno dotezanje ostvaruje se uporabom ručnih, pneumatskih odnosno hidrauličkih kliješta. Prilikom dotezanja kliještima, kliješta se uvijek koriste u paru. Dotezanje radne šipke ostvaruje se navrtačom radne šipke.

U novije doba sve je više u upotrebi sustav vršnog pogona. Prema nekim ispitivanjima, upotreba vršnog pogona ubrzala je proces bušenja na bušotinama u Aziji za 20%. Vršni pogon zamjenjuje upotrebu vrtaćeg stola i radne šipke, ovješeno je za kuku i ostvaruje vertikalna kretanja od podišta do krune toranja krećući se vodilicama. Cijeli sustav sastoji se

od motora, isplačne glave, prijenosnog mehanizma, elevatora i sklopa za navrtanje i odvrtnje alatki. Prednosti vršnog pogona u odnosu na pogon vrtaćim stolom su:

- bušenje korištenjem pasova čime se za trećinu smanjuju prekidi rotacije i potiskivanje fluida;
- mogućnost promjene smjera rotacije alatki i čišćenje kanala bušotine tijekom vađenja i spuštanja alatki;
- omogućavanje više slobodnog prostora na radnom podištu tornja eliminirajući kupolu radne šipke i kliješta;
- dotezanje navojnih spojeva ostvaruje se elektromotorom i
- mogućnost istovremenog obavljanja cirkulacije fluida i rotacije zaštitnih cijevi tijekom njihove ugradnje.

Danas postoje električni i hidraulički sustavi vršnog pogona. Električni sustav vršnog pogona pokretan je elektromotorom sa sustavom zračne kočnice. Prijenos rotacije ostvaruje se upotrebom para zupčanika čiji je prijenosni omjer 5,33:1. Motor se hladi zračnim sustavom pogonjenim asinkronim elektromotorom. Vršni pogon pričvršćen je svornjacima za isplačnu glavu i vertikalno se kreće tračnicama. Sklop kojim se odvrću i navrću alatke sastoji se od moment ključa i motora. Primarno navrtanje, odnosno navrtanje ostvaruje sustavom koji uključuje dva cilindra moment ključa povezana sa torzionom cijevi. Nakon što je elevator obuhvatio spojnicu cijevi, otvaranjem ventila dovodi se tlak u torzione cilindre i dolazi do zakretanja cijevi do 25°, odnosno do ostvarivanja maksimalnog momenta (81,35 kNm). Konačno dotezanje, tj. odvrtnje ostvaruje se motorom. Rotirajuća glava služi da zračni i hidraulički spojevi budu povezani tijekom rada sustava ta navrtanje i odvrtnje. Sustav vršnog pogona još uključuje sigurnosni zasun, adapter i aktuator za izbacivanje stremena i upravljački dio (Matanović, 2007).

Današnji sustav vršnog pogona odlikuju se visokom efikasnošću s mogućnošću rada u uvjetima visokih tlakova, momenata torzije, itd. Tako hidraulički vršni pogon tvrtke Drillmec, može izdržati maksimalna opterećenja od 181 t do 317 t, pri radnom tlaku potiskivanja isplake od 345 bar, te brzine rotacije do 180 okretaja u minuti. Maksimalna torzija tijekom bušenja iznosi od 36 000 Nm do 39 240 Nm. Električni sustavi vršnog pogona istoimene tvrtke, mogu izdržati opterećenja od 340 t do 680 t, pri radnom tlaku potiskivanja

isplake od 517 bar, brzine rotacije 108 do 150 okretaja u minuti. Snage su 850 kW, odnosno 1 200 kW i mogu postići maksimalnu torziju tijekom bušenja od 50 000 Nm do 105 000 Nm (Drillmec, 2018).

4.4. Dubinski motori

Treći način rotacije dlijeta ostvaruje se upotrebom dubinskih motora. Potrebne karakteristike dubinskog motora su: efikasnost od najmanje 65%, neosjetljivost na djelovanje isplake, otpornost na temperature do 180 °C te ostvarenje zadovoljavajuće brzine rotacije dlijeta i momenta torzije. Kod odabira motora važni čimbenici za razmatranje predstavljaju vanjski promjer motora, moment torzije i dostupna energija za pogon motora. Dubinski motori dijele se na:

- vijčane motore (Moineau motori);
- turbinske bušilice i
- elektro bušilice.

Vijčani motori mogu ostvarivati malu brzinu i uz veliki moment rotacije, veliku izlaznu snagu. Hidraulička energija prelazi u mehaničku protiskivanjem radnog fluida kroz motor, gdje se radni fluid kreće prema području nižeg tlaka i prisiljava rotor na rotaciju. Moment se prenosi na dlijeto zglobnim spojem rotora na izlaznu osovinu i spojnicu dlijeta. Turbinske bušilice sastoje se od motora višestupanjskih statorskih i rotorskih lopatica, sustava ležaja i pogonske osovine. Kretanju lopatica rotora moguće je ostvariti potiskivanjem plina ili tekućine. Zbog velikih brzina rotacije turbinske bušilice nisu pogodne za rad sa žrvanjskim dlijetima. Elektrobušilice su pogonjene trofaznim kaveznim elektromotorom smještene u kućište ispunjeno uljem. Dovod električne energije ostvaruje se plosnatim ili okruglim kablom. Motor i kabel moraju biti otporni na temperaturu od 150 °C do 205 °C (Matanović, 2007).

4.5. Sustav manipuliranja alatkama

Sustav manipuliranja alatkama ima važnu ulogu u procesu bušenja. Sastoji se od različitih uređaja, koji obavljaju operacije uvlačenja alatki u toranj, navrtanje, kao i uklinjenje bušačkog niza. U dosadašnjoj praksi, obavljanje ovakvih poslova zahtijevalo je direktnu uključenost

osoblja bušaćeg postrojenja. Rezultat toga je smanjenja sigurnost osoblja na bušaćem postrojenju, kao i povećana mogućnost pogrešaka u radu i smanjenje efikasnosti u procesu bušenja, stoga se pristupilo razvoju navedenih uređaja koji su smanjili potrebu za osobljem u operacijama manipulacije alatkama i samim time doveli do povećanja učinkovitosti u procesu bušenja.

4.5.1. Sustavi za uvlačenje alatki u toranj

Klasični način manipulacije bušaćim alatkama s odlagališta alata, smještenog izvan tornja, na podište tornja i obrnuto podrazumijeva direktnu uključenost osoblja bušaćeg postrojenja. Pri tome je jedan dio ljudstva zadužen za prijenos cijevi i šipki s odlagališta alata na ulaznu rampu s koje se podižu alatke i obrnuto. Drugi dio osoblja zadužen je za rukovanje vitlom i usmjeravanjem alatki kojima se manipulira. Pri tome se osoblje izlaže velikim opasnostima od mogućih udaraca i nagnječenja alatkama, kao i opasnostima od pada predmeta s visine. Upotrebom automatiziranog sustava za manipulaciju alatkama, u potpunosti se izbjegava čovjekov kontakt s alatkama tijekom manipulacije alatkama i smanjuje vrijeme potrebno za pojedine operacije. Danas je u upotrebi nekoliko vrsta automatiziranih sustava za uvlačenje alatki u toranj:

- fiksni automatizirani sustav za uvlačenje alatki u toranj;
- automatizirani sustav za uvlačenje alatki u toranj s podizanjem;
- automatizirani sustav s mehaničkom rukom i
- automatizirani sustav s mobilnom rukom.

4.5.1.1. Fiksni automatizirani sustav za uvlačenje alatki u toranj

Za fiksni automatizirani sustav za uvlačenje alatki u toranj (engl. *catwalk*) karakteristično je da je konstrukcija za povlačenje cijevi fiksna struktura koja se sastoji od rampe povezane s podištem tornja. Kretanje cijevi ostvaruje se specijalnim elementom koji potiskuje cijev. Ovakav sustav je veoma jednostavan za sastaviti i rastaviti, jeftin za održavanje i preopterećenje sustava je malo. Negativna strana je što se ostvaruje veliko trenje prilikom kretanja cijevi po površini ulazne rampe. Ovakav sustav koristi se na malim bušaćim postrojenjima (Nkanza i dr., 2018).

4.5.1.2. Automatizirani sustav za uvlačenje alatki u toranj s podizanjem

Ovaj sustav za uvlačenje alatki u toranj sastoji se od hidrauličkih vitla ili hidrauličkih cilindara, potisnog sustava, pomoćne ruke, transportne ruke i rampe. S bočne strane sustava postoji mehanizam koji preuzima cijev s odlagališta bušačkog alata i prebacuje u utor transportne ruke. Radom hidrauličkih cilindara, odnosno hidrauličkog vitla, podiže se pomoćna ruka koja gura transportnu ruku prema podištu tornja. Na transportnoj ruci nalazi se potisni sistem koji gura cijev da bi došla što bliže elevatoru. Sustav sadrži pomoćni mehanizam koji sprječava pad cijevi prilikom transporta. Sustav uvlačenja s podizanjem koristi se na kopnenim postrojenjima i platformama za bušenje. Veoma je siguran, no proces nije kontinuiran i efikasnost je niska (Nkanza i dr., 2018). Osim za uvlačenje cijevi u toranj, može se koristiti i za uvlačenje bušačkog i ostalog alata. Postoje varijacije ovog sustava, od onih gdje je transportna ruka s jedne strane uprta u pomoćnu, a s druge kliže po rampi, sustav s dvije pomoćne ruke, itd. Na slici 4-2. nalazi se sustav za uvlačenje koji ima dvije pomoćne ruke pogonjene cilindrima. Zanimljivo je spomenuti da postoji samohodni sustav za uvlačenje. Tako se sustav PadWalkerTM, tvrtke Canrig Drilling Technology Ltd., kreće brzinom od 18,36 metara na sat i upravljan je putem bežičnog upravljača (Nabors, 2018a).



Slika 4-2. Automatizirani sustav za uvlačenje s podizanjem s dvije pomoćne ruke (Fet, 2018)

4.5.1.3. Automatizirani sustav s mehaničkom rukom

Ovaj sustav konstruiran je kao kombinacija dizalice, prijenosne horizontalne ruke i vertikalne ruke. Cijevi se najprije prebacuju na horizontalnu ruku i ruka se podiže prema gore. Rukom dizalice cijev se prebacuje u vertikalnu ruku koja pridržava cijev, odnosno alatku prilikom operacije navrtanja, odnosno odvrtanja. Prednost ovog sustava je što je relativno brz u odnosu na ostale sustave (Nkanza i dr., 2018). Na slici 4-3. nalazi se sustav Terra Invder 350 tvrtke Herrenknecht.



Slika 4-3. Automatizirani sustav s mehaničkom rukom Terra Invader 350 (Nce, 2014)

Također, razvijaju se brojne varijacije ovog sustava, kao što je sustav koji sadrži mobilnu ruku koja rotacijom od 90° prenosi cijev iz horizontalnog u vertikalni položaj i spušta cijev u mišju rupu. Takav sustav razvija tvrtka Drillmec pod nazivom THV 7700, prikazan na slici 4-4. Neki od sustava spuštaju cijevi u mišju rupu i navrću cijevi tako da se dobije pas cijevi koji se spaja s ostalim nizom cijevi.



Slika 4-4. DRILLMEC THV 7700 daljinski upravljani sustav za podizanje alatki (Drillmec, 2015)

4.5.2. Automatizirani manipulatori na bušačem tornju

Da bi obavljanje operacija navrtanja, odvratanja i sama manipulacija alatkama bile provedene što uspješnije, na samom tornju implementirani su automatizirani sklopovi za manipulaciju alatom na podištu tornja (u daljnjem tekstu manipulator).

4.5.2.1. Manipulatorska ruka za prijenos cijevnih alatki iz horizontalnog položaja u vertikalni

HTV manipulatorska ruka (engl. *horizontal to vertical arm*) predstavlja sustav kojim se zahvaćaju cijevi koje se nalaze u horizontalnom, odnosno u položaju pod nagibom na sustavu za uvlačenje alatki u toranj i prenose ih u vertikalni položaj u mišju rupu ili otvor vrtaćeg stola. Također, koristi se u kombinaciji s drugim uređajima za navrtanje cijevi u niz od dvije, tri ili četiri cijevi. Sustav se kreće po šinama pričvršćenim za toranj i sadrži

teleskopsku ruku. Promjer cijevi koje može obuhvatiti kreće se od 0,073 metara do 0,508 metara i maksimalne mase do 10 tona. Sustavom se može upravljati ručnim načinom rada iz bušaće kabine ili radne konzole na podištu tornja, odnosno automatiziranim načinom čime se smanjuje potreba za ljudskim radom. Na slici 4-5. nalazi se HTV manipulatorska ruka tvrtke TSC (TSC, 2015).



Slika 4-5. HTV manipulatorska ruka tvrtke TSC (TSC, 2015)

4.5.2.2. Automatizirana ruka za manipulaciju alatkama na podištu tornja

DFMA manipulatorska ruka (DFMA- engl. *Drill Floor Manipulator Hand*) koristi se kao pomoćni sustav za preuzimanje cijevi, šipki i risera, u slučaju odobalnih postrojenja, od sustava za uvlačenje u vertikalnom položaju i usmjeravanje i vođenje iznad otvora bušotine. Nalazi se smještena na postolju zavarenom za podište tornja ili je pričvršćena za donju stranu potporne strukture kojom prolaze vodilice za sustav vršnog pogona. Također, može se nalaziti ispod sustava manipulatora za vođenje (engl. *Vertical Pipe Handling System- VPH*), pričvršćenog za toranj, u slučaju potrebe za rukovanjem raznim alatkama. Manipulatorskom

rukom moguće je upravljati pomoću sustava za upravljanje u bušačevoj kabini i daljinskim upavljačem (Aker Solutions, 2012).

Rad DFMA manipulatorske ruke obuhvaća područje od ulaznih vrata tornja do otvora bušotine. Manipulatorska ruka UHT 1 200, prikazana na slici 4-6., pogonjena je hidrauličkim sustavom s maksimalnim opterećenjem od 1,2 t. Posjeduje mogućnost horizontalne rotacije ruke od 360°, s horizontalnim dosegom od 7,7 m i izvlačenjem teleskopske ruke od 5 m. Uvjeti rada ograničeni su na temperaturu od -20 °C do 45 °C. UHT 1 200 sadrži osnovnu teleskopsku ruku na koju se ugrađuju nastavci za manipulaciju alatima raznih veličina i promjera. Tako hvataljka za cijevi može obuhvatiti cijevi promjera 0,067-0,254 m, dok vodič cijevi može obuhvatiti promjer cijevi 0,073-0,762 m (Nov, 2016).



Slika 4-6. Manipulatorska ruka UHT 1 200 tvrtke NOV (Nov, 2016)

Također, postoje izvedbe koje se mogu horizontalno kretati po traci, čime se povećava sposobnost manipulacije alatima.

4.5.2.3. Vertikalni manipulator

Vertikalni manipulator (engl. *Vertical Pipe Handling System- VPH*) koristi se za manipulaciju cijevima u vertikalnom položaju. Konstrukcija ponajprije ovisi o platformi na kojoj se pričvršćuju cijevi u vertikalnom položaju (engl. *Fingerboard*), zadaći koju treba obavljati, kao i potrebi za radom u promjenjivom vertikalnom i horizontalnom smjeru. Vertikalni manipulator koristi se za prijenos cijevi s odlagališta bušačkog alata unutar tornja do iznad uklinjenog niza alatki i obrnuto. Sastoji se od više sinkroniziranih manipulatora za prihvatanje cijevi u nekoliko točaka da bi se osigurao vertikalni položaj cijevi. Svaki od tih manipulatora ima podešavajući prihvatni sustav koji može obuhvatiti cijevi različitog promjera. Dio ovog sustava koji se nalazi na podištu tornja, kreće se šinama čime se olakšava prihvat cijevi s odlagališta bušačkog alata unutar tornja. Vertikalni manipulator tvrtke MHWirth može manipulirati nizom cijevi mase od 6,9 t do 16,5 t pri brzini od 0,2 m/s do 0,5 m/s. Visina ovakvog sustava kreće se od 5,9 m do 48 m, pri čemu je moguće ostvariti rotaciju sustava oko vertikalne osi od 210° i 270° (Mhwirth, 2017).

Na slici 4-7. prikazan je vertikalni manipulator tvrtke Aker Solutions. Manipulator ima sposobnost kretanja u horizontalnom smjeru, čime se olakšava pristup cijevima.



Slika 4-7. Vertikalni manipulator tvrtke Aker Solutions (Aker Solutions, 2012)

4.5.2.4. Automatizirani hidraulički sustav za navrtanje

Na većini kopnenih bušaćih postrojenja, manipulacijske poslove obavlja osoblje. Takav posao zahtijeva izuzetnu snagu, koncentraciju i spremnost na rad od 12 sati po smjeni. Prilikom takvog posla, osoblje rukuje raznim ručnim i poluautomatiziranim alatkama za navrtanje, podmazuje navoje cijevi, manipulira klinovima, lancima, itd. Obavljanje posla klinaša zahtijeva veliki napor uslijed teških uvjeta rada koji uključuju opasnosti od ozljeda prilikom rukovanja masivnim kliještima i ostalim alatkama na podištu, kao i pada predmeta s visine, ali i opasnosti uslijed neopreznosti i smanjenja koncentracije tijekom ponavljanja istih operacija. Uvođenjem potpuno automatiziranog hidrauličkog sustava za navrtanje (engl. *Iron Roughneck*) uvelike se povećava sigurnost i efikasnost u radu postrojenja eliminiranjem potrebe osoblja za rad na operacijama navrtanja, odnosno odvrtnja cijevi. Također, sprječavaju se komplikacije i zastoji uslijed nepravilnog položaja kliješta, nedovoljnog ili prevelikog momenta dotezanja, itd. Današnji hidraulički sustavi za navrtanje predstavljaju složeni trodjelni sklop. Takav sklop sastoji se od stezaljke koja tijekom

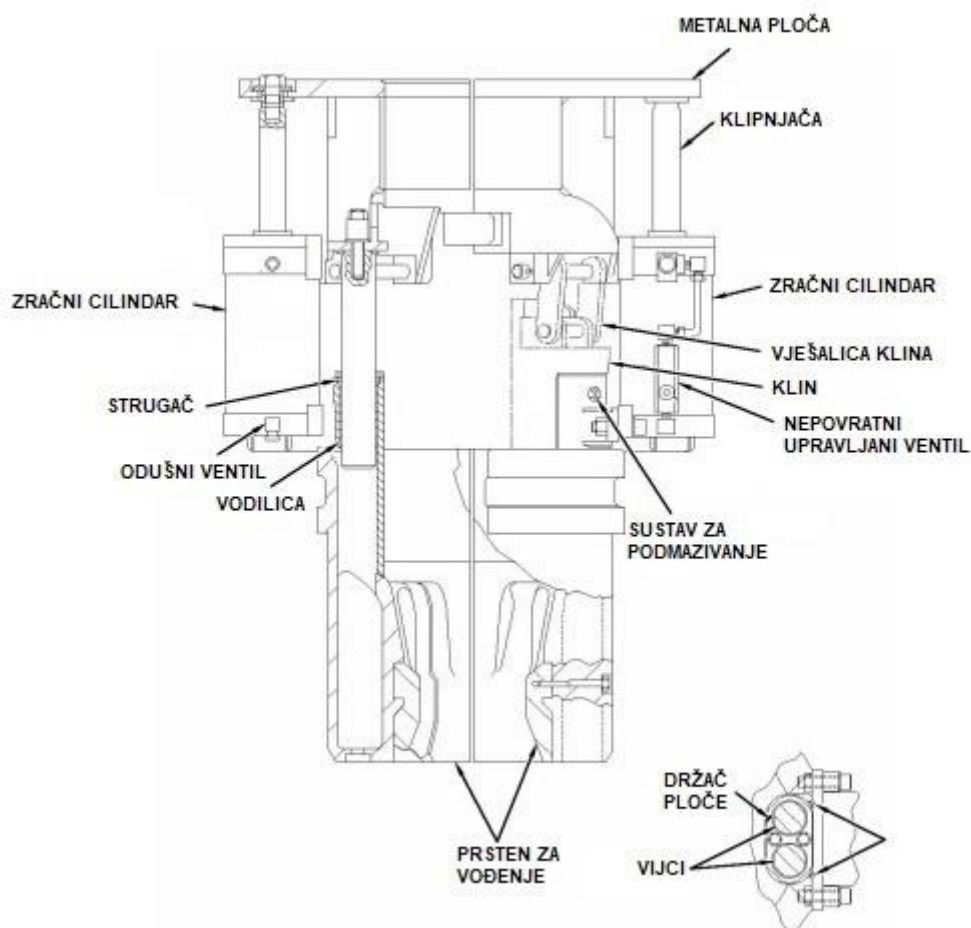
procesa navrtanja pridržava uklinjenu cijev i sprječava njenu rotaciju; navrtača (engl. *Spinner*), odnosno sustava valjaka, kojim se navrće, odnosno odvrće cijev s uklinjenog niza alatki te moment ključa (engl. *Torque Wrench*), smještenog iznad stezaljke, kojim se ostvaruje veći moment torzije te se dodatno doteže cijev na uklinjeni niz. Automatizirani hidraulički sustavi za navrtanje sadrže senzore koji imaju mogućost prepoznavanja promjera i položaj cijevi i ostale karakteristike i na taj način ostvariti potrebno otvaranje prije zahvaćanja navedenih sklopova i pozicioniranje sustava. Također, ovi sustavi mogu se kretati sustavom šina na podištu tornja. Upravljanje ovim sustavom moguće je iz bušačeve kabine, ožičenim daljinskim upravljačem i kod modernijih izvedbi daljinski, putem bežične mreže. Prednost ovakvog sustava je što je kompaktan i zauzima malo prostora na podištu tornja. Na slici 4-8. nalazi se hidraulički navrtač AR-3200, tvrtke NOV, kojeg karakterizira masa od 5,49 t, mogućnost navrtanja brzinom 100 o/min uz postizanje momenta navrtanja od 2 711 Nm (maksimalni mogući moment dotezanja iznosi 135 582 Nm, a otpuštanja 162 698 Nm) pri čemu može manipulirati bušačim šipkama i teškim cijevima promjera od 0,0889 m do 0,24765 m (Nov, 2013).



Slika 4-8. AR-3200 automatizirani hidraulički sustav za navrtanje cijevnih alatki tvrtke NOV (Nov, 2013)

4.5.2.5. Automatizirani klinovi

Danas se još uvijek u procesu bušenja na kopnenim bušaćim postrojenjima koriste klinovi za čije se manipuliranje koristi ljudski rad. Ovi, u odnosu na automatizirane klinove, imaju niz negativnih strana: za manipulaciju je potreban jedan do dva radnika, povećava se opasnost od ozljeda uslijed nepravilnog podizanja i spuštanja klinova, smanjena je efikasnost postrojenja, itd. Upotrebom automatiziranih klinova, povećava se efikasnost u radu postrojenja, ubrzava rad i povećava sigurnost osoblja u radu. Obzirom na pogonski sustav, automatizirani klinovi dijele se na zračno pogonjene (pneumatske) klinove i hidraulički pogonjene klinove. Na slici 4-9. prikazan je bokocrt pneumatskog sustava klinova PS-16 tvrtke NOV.



Slika 4-9. Bokocrt pneumatskog sustava klinova PS-16 (NOV, 2008)

Sustav klinova sastoji se od metalne ploče, sustava zračnih cilindra s klipnjačom, vodilice, odušnog i nepovratnog upravljanog ventila, sustava za podmazivanje, prstena za vođenje, strugača, QD konektora, sustava za podmazivanje i klinova. Svaki sustav automatiziranih klinova sadrži četiri klina. Sami klinovi sastoje se od tijela klina, držača klina, umetka klina i vijaka za pričvršćivanje. Prsten za vođenje niza alata nalazi se na donjoj strani sustava automatiziranih klinova i služi za centriranje alatki prilikom njihove kretnje. Prsten je podijeljen na dva dijela, koji se razdvajaju u horizontalnom smjeru prilikom spuštanja klinova. Ovisno o vanjskom promjeru cijevi, koriste se prsteni različitog unutarnjeg promjera. Navedeni sustav sastoji se od dvaju cilindara povezanih klipnjačom s hodom klipa od 0,2159 m pri tlaku kretanja od 6,2 bar. Podizanjem sustava klipa s klipnjačom, podižu se i razmiču klinovi, čime se oslobađa niz bušaćih alatki. Obrnutim postupkom dolazi do uklinjavanja alatki. Ovim sustavom upravlja se iz kabine bušača, ali može i na samom podištu ručnim otvaranjem kontrolnog ventila. U slučaju prevelikog tlaka u sustavu, otvaraju se odušni ventili koji smanjuju tlak u sustavu. Sustav rada hidrauličkih klinova sličan je ovome, samo što se za pogon koristi hidraulički fluid čije su osnovne karakteristike sposobnost prijenosa energije, mala sklonost oksidaciji i stvaranju pjene, itd. Postoji varijacija ovih sustava klinova koji nije integriran, već se posebno sastoji od klinova i pogonskog sustava s okvirom. Ovakav sustav prikazan je na slici 4-10.



Slika 4-10. Sustav automatiziranih klinova s okvirom (Nov, 2010)

4.6. Samohodni sustav za pomicanje bušaćeg postrojenja na malu udaljenost

Većinu današnjih kopnenih bušaćih postrojenja tijekom preseljenja treba rastaviti, dovesti na željenu lokaciju i ponovno postaviti u radni položaj. Postoje dva osnovna načina postavljanja tornja. Jedan od načina je sastavljanje tornja od segmenata u uspravnom položaju, a drugi podrazumijeva sastavljanje tornja u horizontalnom položaju i podizanje sustavom pogonskih motora i dizalice. Takvi načini produžuju vrijeme potrebno za premještanje cijelog postrojenja s opremom, a ujedno zahtijevaju velik broj osoblja, transportnih vozila, kao i ostale pomoćne opreme. U slučaju potrebe za preseljenjem postrojenja na kraću udaljenost, ponekad se primjenjuje teretna prikolica vučena kamionima. Prilikom korištenja teretne prikolice, potrebno je odvojiti kablove od postrojenja i ostalih sustava, maknuti bušaće cijevi i ostale alatke kako bi se smanjila ukupna masa tereta na teretnoj prikolici, omogućilo lakše manevriranje teretnom prikolicom i povećao maksimalni dopušteni kut inklinacije postrojenja. Uz to, upotreba teretne prikolice zahtijeva korištenje serijski povezanih kamiona, čime se za ovakav transport zahtijeva iskustvo i spretnost. Da bi se učinak transporta na kraće udaljenosti učinio efikasnijim, razvijen je samohodni sustav za pomicanje bušaćeg postrojenja na malu udaljenost. Samohodni sustav za pomicanje bušaćeg postrojenja na malu udaljenost predstavlja efikasniji, jeftiniji, precizniji i brži sustav za preseljenje na kraće udaljenosti u odnosu na klasični način premještanja postrojenja i upotrebu teretne prikolice. Samohodni sustav postrojenja sastoji se od sustava hidrauličkih cilindara zaduženih za podizanje i spuštanje postrojenja, sustava hidrauličkih cilindara zaduženih za horizontalnu kretanju postrojenja, sigurnosnog hidrauličkog sustava niskog tlaka i četiri papuče. Ovim sustavom upravlja se daljinskim uređajem i moguće je istodobno upravljati sa svima od četiri sustava za kretanje, ali i svakim sustavom pojedinačno. Prilikom kretanja postrojenja, sustav cilindra podiže se postrojenje na određenu visinu, a zatim sustavi cilindara, zaduženi za horizontalnu kretanju, pomiču tako podignuto postrojenje u željenom smjeru. Nakon toga, sustav cilindara spušta postrojenje na tlo i pomoću cilindara, zaduženih za horizontalni pomak postrojenja, pomiče papuče postrojenja, koja se u tome trenu nalazi na određenoj visini iznad tla. Poslije toga, cijeli postupak se ponavlja. Prije obavljanja operacije transporta postrojenja, potrebno je obaviti pripremne radove poravnavanjem tla kojim će se kretati postrojenje i postavljanjem drvene strukture, kojom će se omogućiti što uravnoteženije kretanje postrojenja bez naginjanja. Ovim sustavom

moguće je mijenjati smjer kretnje postrojenja, pri čemu je potrebno obaviti ručno zaokretanje svakog pojedinačnog sustava za kretanje (Elhamid Ali i dr., 2016). Na slici 4-11. nalazi se samohodni sustav tvrtke Patterson- UTI.



Slika 4-11. Samohodni sustav za preseljenje bušačkog postrojenja na malu udaljenost tvrtke Patterson- UTI (Patterson-UTI, 2017)

Također, postoji samohodni sustav s upotrebom valjaka. Sustav se sastoji od nekoliko uskih i dugih paralelnih papuča. Na jednom kraju papuče nalazi se sustav hidrauličkog cilindra. Princip rada temelji se na podizanju postrojenja sustavom cilindara smještenih na valjcima koji se nalaze na papučici. Radom sustava cilindara za horizontalno kretanje, povlači se postrojenje pri čemu se valjci kreću po površini postrojenja. Nakon toga, postrojenje se spušta na tlo i sustav cilindara za horizontalno kretanje premješta papuče i cijeli proces se ponavlja (CanElson, 2015).

Prednosti ovog sustava su:

- prilikom premještanja postrojenja nije potrebno premjestiti fluide i opremu s postrojenja;
- moguće je premještati postrojenje povezano sa sustavom za uvlačenjem, koji također ima samohodni sustav;

- nije potrebno odvajati električne kablove postrojenja;
- sustav je dizajniran da je moguće prevesti teretnom prikolicom postrojenje sa samohodnim sustavom bez potrebnih modifikacija postrojenja;
- ako je mala udaljenost nove lokacije, nije potrebno premještati energetske i isplačne module, već se kraće cijevi i kablovi zamjenjuju onima veće duljine.

Sustav u potpunosti ispunjava zahtjeve API 4F specifikacije za bušaće garniture. Također, moguće je implementirati samohodni sustav i u isplačni sustav i sustav za napajanje koji se sastoji od pogonskih motora, generatora, transformatora i druge električne instalacije (Elhamid Ali i dr., 2016).

RWS-300-EXT, samohodni sustav tvrtke Bentec, može postići brzinu kretanja od 0,0039 m/s (14 m/h), pri čemu svaka jedinica ovog sustava može biti opterećena masom od 300 t, što znači da ovakav sustav može transportirati postrojenje ukupne mase 1 200 t. Sustav se može kretati u dvadeset različitih smjerova unutar 360° i biti operativan pri temperaturama od -45 °C do +55 °C (Bentec, 2018).

4.7. Isplačni sustav

Isplačni sustav predstavlja jednu od bitnih komponenata sustava na postrojenju zadužen za pripremu, pročišćavanje i optok isplake. Isplačni sustav sastoji se od:

- isplačnih sisaljki;
- tlačnog voda;
- isplačne glave;
- povratnog voda isplake;
- vibracijskih sita;
- odvajачa pijeka;
- odvajачa silta;
- dekantirajućih centrifuga;
- odjeljivača plin;
- miješalice;

- bazena i pripadajuće opreme;
- sustava za pripremu i obradu isplake i
- skladišnog prostora.

Isplačne sisaljke predstavljaju najvažniju kariku isplačnog sustava. One protiskuju isplaku tlačnim vodom, preko isplačne glave, bušaćih alatki sve do dlijeta gdje se potom obavlja proces čišćenja i iznošenja krhotina na površinu. U upotrebi su klipne i centrifugalne sisaljke. Klipne sisaljke snage do 1 600 kW mogu protiskivati fluid protokom od 3 500 dm³/min. Maksimalni tlak kod protiskivanja fluida iznosi 390 bar. Obično se dijele na jednoradne trocilindrične i dvoradne dvocilindrične. Sastoje se od hidrauličkog i pogonskog dijela. Pogonski dio prenosi energiju od pogonskih motora preko pogonske osovine, pogonskog i pogonjenog zupčanika na koljenastu osovину koja upravlja radom klipnjača. Radom klipnjače, unutar cilindra pokreće se klip koji omogućuje usis i tlačenje isplake. Broj hodova dvoradnih sisaljki je od 40 do 70 hodova u minuti, dok kod jednoradnih sisaljki ta brojka iznosi od 50 do 150 hodova u minuti. Centrifugalne sisaljke ostvaruju potisnu silu na fluid rotacijom lopatica rotora. Rad pumpe ostvaruje se prijenosom snage elektromotora ili klinastim remenjem s nekog drugog pogonskog motora. Na postrojenju se koriste za miješanje i prepumpavanje isplake, hlađenje kočnica, dobavu vode, itd. Tlačnim vodom potiskuje se isplaka prema bušaćim alatkama, a zatim u samu bušotinu. Za tlačni vod karakteristično je da bude što jednostavniji, s minimalnim brojem koljena i iskrivljenja i s ujednačenijim promjerom cijevi. Isplaka koja sadrži čestice stijena, pijeska i druge čvrste čestice, dolazeći na površinu, prvo prolazi kroz vibratore sa sitima. Nakon prolaska isplake kroz sita, ona prolazi taložnim bazenom, gdje dolazi do taloženja ostataka većih čestica. Kod prisustva plina u isplaci, važno je odvojiti plin i spaliti ga na baklji. U tu svrhu, koriste se otplinjivači isplake. Kao otplinjivači, koriste se primarni otplinjivači, standardni proizvodni separatori, vakuumski otplinjivači, itd. Nakon odvajanja plina, isplaka prolazi kroz odvajanje pijeksa (desandere) i odvajanje silta (desiltere). Princip rada temelji se na djelovanju vrtložne struje unutar konusnog dijela odvajanja, pri čemu dolazi do odvajanja čestica većih i manjih dimenzija. Sve nakupljene krute čestice odbacuju se u otpadnu grabu. Nakon obrade isplake, isplaka prolazi kroz proces pripreme isplake. U slučaju gubitka isplake u bušotini ili potrebe za većim količinama isplake, pripremaju se nove količine isplake. U tu svrhu, postoje miješalice isplake i mlazni lijevci. Kroz mlazne lijevke dodaju se razni praškasti materijali

kao što su barit, bentonit, kemikalije, itd. Za brže dispergiranje i stvaranje većeg podtlaka, iza lijevka postavlja se Venturijeva cijev. Miješalice i mlazne puške primjenjuju se za razbijanje geliranih isplaka, smanjenje prividne viskoznosti isplake, oslobađanje mjehurića plina i sprječavanja taloženja krutih čestica. Modernizacijom sustava za pripremu isplake, istovremeno se pristupa postupku automatizacije. Automatizacija je provedena u upravljanju sisaljka koje omogućuje transfer praškastih tvari, kemikalija i ostalih aditiva iz skladišnih spremnika sve do procesnih spremnika gdje se isplaka miješa pod niskim tlakom, odnosno spremnika u kojima se miješa radom miješalica. Pri tome, rad sisaljki, miješalica, ventila kao i ostale opreme je sinkroniziran. Od upotrebe sustava za pripremu isplake, sustav je prošao tri razine razvoja, dok je trenutno u četvrtoj fazi razvoja. U početku se sve obavljalo ručno, što je iziskivalo stručno i iskusno osoblje za doziranje aditiva i pripremu isplake. Osoblje je doziralo praškaste materijale, kemikalije i aditive, sukladno propisima i na temelju iskustva. Također, upravljalo je radom motora i sisaljki i ručno otvaralo, odnosno zatvaralo ventile. Takav način rada je veoma nepouzdan jer dolazi do problema kao što je preveliko, odnosno premalo doziranje potrebnih tvari, otvaranje, odnosno zatvaranje pogrešnih ventila. Ovakav način doziranja još se uvijek koristi u svijetu. Kod druge razine, proces je djelomično automatiziran. Osoba koja se nalazi u kontrolnoj sobi, nadzire proces pripreme isplake i po potrebi otvara ventile, uključuje u rad sisaljke, pogonske motore i ostalu opremu, obavlja doziranje isplačnih aditiva. Neki od procesa, kao što su transfer aditiva između silosa i mjesta miješanja isplake u potpunosti su automatizirani. Kod treće razine razvoja, upravljanje i nadzor obavlja se iz kontrolne sobe. Operater preko panela odabire količine aditiva za doziranje, sisaljke i miješalice koje će biti uključene u rad, dok se sve ostale operacije automatizirane. Četvrta razina predstavlja automatski proces pripreme isplake. Tijekom procesa, konstantno se provode mjerenja količine isplake, doziranih količina aditiva i ostalih tvari, gustoća isplake, itd. Na osnovi mjerenja u bušotini i na površini, u računalni sustav unose se podaci i kreira model po kojem se optimira sastav isplake. Na osnovi toga, sustav automatski dozira potrebne količine aditiva i pokreće uređaje potrebne za pripremu isplake. Sustav četvrte razine automatizacije nije u komercijalnoj upotrebi, već se nalazi u fazi razvoja i testiranja (Kvame i dr., 2011).

Proces automatizacije proveden je u mjerenju gustoće i reoloških svojstava isplake. Važnost automatizacije u mjerenju ovih svojstava isplake je rano uočavanje dotoka slojnih fluida i

spriječavanja dotoka i erupcija, poboljšanja stabilnosti bušotine, kvalitete čišćenja bušotine, praćenja ekvivalentne gustoće isplake, kao i cjelokupnog procesa bušenja. Tvrtka Halliburton Baroid razvila je uređaj BaraLogix® DRU, prikazan na slici 4-12., za mjerenje gustoće i reoloških svojstava isplake. Ovaj uređaj konstantno obavlja mjerenja, odnosno mjerenja gustoće svake minute i reološka svojstva isplake svakih petnaest minuta. Uređaj periodično uzima uzorke za ispitivanje. Element za samostalno uzimanje uzorka isplake automatski se samopročišćava dušikom s ciljem sprječavanja miješanja ostataka prethodnog uzorka isplake zaostalog na površini s novim uzorkom isplake. BaraLogix® DRU ima sposobnost kontinuiranog rada i pohranjivanja podataka tijekom četrnaest dan (OE digital, 2016).

Uređaj ima sposobnost rada s fluidima temperature do 121 °C i vanjskim uvjetima rada od -16 °C do 60 °C. Također, uređaj ima mogućnost mjerenja gustoće u rasponu od 0 kg/m³ do 3 000 kg/m³, a kod određivanja reoloških svojstava, moguće je ostvariti brzine rotacije od 3, 6, 100, 200, 300 i 600 okretaja u minuti (Halliburton, 2017).



Slika 4-12. Uređaj BaraLogix® DRU (Halliburton, 2017)

5. EFIKASNOST U UPOTREBI AUTOMATIZIRANIH KOPNENIH BUŠAČIH POSTROJENJA

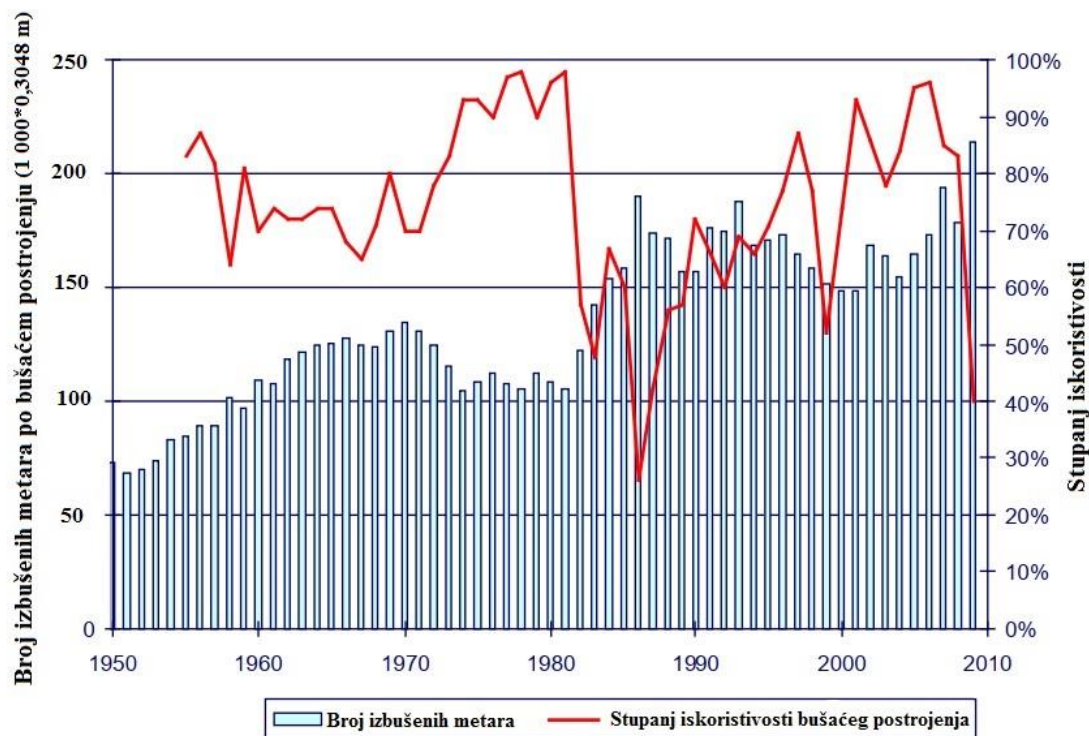
Efikasnost postrojenja važan je pokazatelj sposobnosti obavljanja zadanih operacija što kvalitetnije i u što kraćem vremenskom periodu. Efikasnost u bušenju ogleda se u napretku dlijeta, cijeni po izbušenom metru i specifičnoj mehaničkoj energiji, odnosno energiji potrebnoj za razrušavanje jediničnog volumena stijene. Tako se povećanjem napretka dlijeta povećava efikasnost bušenja. Povećanje efikasnosti bušenja obrnuto je proporcijalno povećanju cijene izbušenog metra bušotine i specifične mehaničke energije (Drilling Contractor, 2009).

Prema američkoj Upravi za informiranje o energiji (engl. *Energy Information Administration*- EIA), važni čimbenici kod razmatranja efikasnosti bušačeg postrojenja su:

- broj izbušenih metara po satu;
- dani potrebnih za izradu bušotine;
- broj izbušenih metara po bušačem postrojenju;
- rezerve ugljikovodika po bušotini;
- rezerve ugljikovodika po bušačem postrojenju;
- količine pridobivenih ugljikovodika po bušotini;
- uspješnost izrade bušotine;
- cijena po izrađenom metru bušotine i
- potrošnja energije.

U nastavku rada bit će prikazani podaci o efikasnosti rada bušačih postrojenja na području SAD-a u razdoblju od 1950. do 2010. godine. Tijekom godina, efikasnost postrojenja rasla je zahvaljujući razvoju tehnologije, usavršavanju i većem stupnju obrazovanja osoblja, većoj sigurnosti, razvoju i automatizaciji postrojenja. Na slici 5-1. nalazi se grafički prikaz efikasnosti postrojenja u ovisnosti o izbušenim metrima bušotine po postrojenju. U prikazanom vremenskom periodu, od 1950. godine do 2010. godine raste broj izbušenih metara po postrojenju. Od 1980-ih do 2008. godine, broj izbušenih metara po postrojenju povećao se s 30 480 metara na 60 960 metara. Prvih 75. bušačih postrojenja u 2004. godini imalo je prosjek od ukupno 140 513 izbušenih metara po postrojenju, od početka rada

postrojenja. Istodobno, stupanj iskoristivosti postrojenja je rastao, s naglim padovima tijekom 1986., 1999. i 2010. godine.



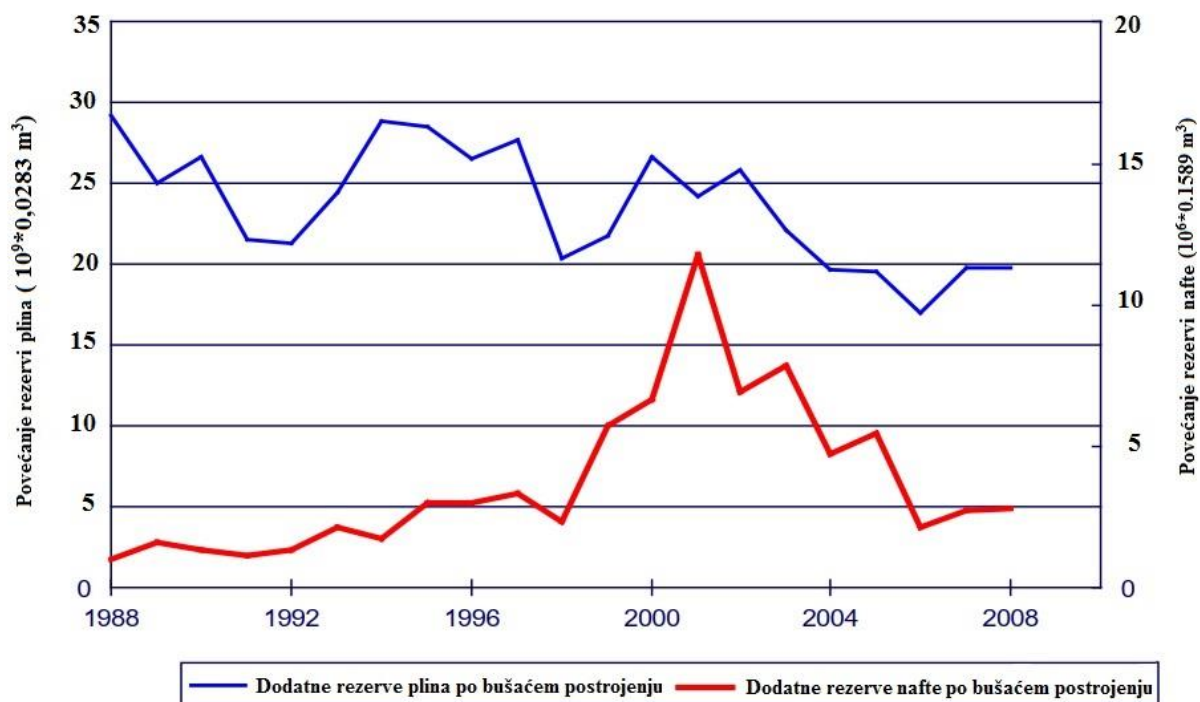
Slika 5-1. Efikasnost bušačkog postrojenja iskazana u odnosu na broj izbušenih metara i stupanj iskoristivosti bušačkog postrojenja (EIA, 2010)

Sljedeći pokazatelj efikasnosti postrojenja prikazan je u usporedbi broja izbušenih bušotina po postrojenju. Kao što je vidljivo na slici 5-2., najveći broj bušotina izbušen je u drugoj polovici 1980-ih godina kad je godišnje izbušeno oko 40 bušotina po postrojenju. Nakon toga, broj izbušenih bušotina po postrojenju u prosjeku pada da bi u 2010. godini dosegao iznos od 30 izbušenih bušotina po bušačem postrojenju. Smanjenje broja izbušenih bušotina krije se u činjenici da se danas izrađuju kompleksnije i dublje bušotine. No, prilikom bušenja, kompanije smanjuju broj dana potrebnih za izradu bušotine. Tako je kompanija Southwestern Energy, na području Fayetteville šejla smanjila broj dana potrebnih za izradu bušotine s 20 dana tijekom 2007. godine na 11 dana tijekom 2009. godine. Slično tome, tvrtka Petrohawk Energy Corporation smanjila je broj dana potrebnih za izradu bušotine u Haynesville šejlu sa 69 dana na početku 2009. godine na 52 dana krajem 2009. godine. Broj negativnih bušotina smanjio se s 43% krajem 1960-ih godina na 10% tijekom 2010. godine.



Slika 5-2. Efikasnost postrojenja iskazana u odnosu broja bušotina po bušačem postrojenju u vremenskom razdoblju od 1950. godine do 2010. godine (EIA, 2010)

Prilikom usporedbe novootkrivenih rezervi nafte i plina po bušačem postrojenju, na slici 5-3. vidljivo je znatno opadanje rezervi nakon 2002. godine i stagnacija u 2007. i 2008. godini. Razlog smanjenju povećanja rezervi je u smanjenju pronalaska novih ležišta. Danas su sva novootkrivena ležišta relativno mala, što donosi manji prinos rezervama ugljikovodika.



Slika 5-3. Povećanje rezervi plina i nafte po bušačem postrojenju u razdoblju od 1988. godine do 2008. godine (EIA, 2010).

5.1. Efikasnost pogonskih motora

Bušenje na većim dubinama zahtijeva više bušaćih alatki, što zahtijeva i veću snagu pogonskih motora. Zbog takvih zahtjeva, pristupilo se modifikaciji u veličini, masi, snazi i momentu torzije pogonskih motora. Tako su uvedeni elektromotori izmjenične struje, s rasponom snage od 336 kW do 1 491 kW, što je omogućilo obavljanje operacija vršnim pogonom, dizalicom i isplućnim sisaljka pri većim opterećenjima. Također, izmjene na motorima omogućile su postizanje do 50% više snage i momenta torzije ne mijenjajući dimenzije kućišta motora. Za primjer se može uzeti motor za pogon sustava vršnog pogona, četvrtastog oblika, WL12BB060, tvrtke Ward Leonard. Model ovog motora, snage 447 kW i maksimalne torzije 3 695 Nm, ima iste dimenzije kao standardni motor snage 298 kW i ostvaruje 50% veću izlaznu snagu i moment torzije. Istovremeno, masa mu je manja za 544 kilograma u odnosu na standardni motor snage 447 kW. Motor WL29BC200 za pogon isplućnih sisaljki i dizalice, istoimene tvrtke, snage 1 491 kW ima iste dimenzije kao i standardni motor snage 1 119 kW. Također, dimenzije i masa navedenog motora su manje

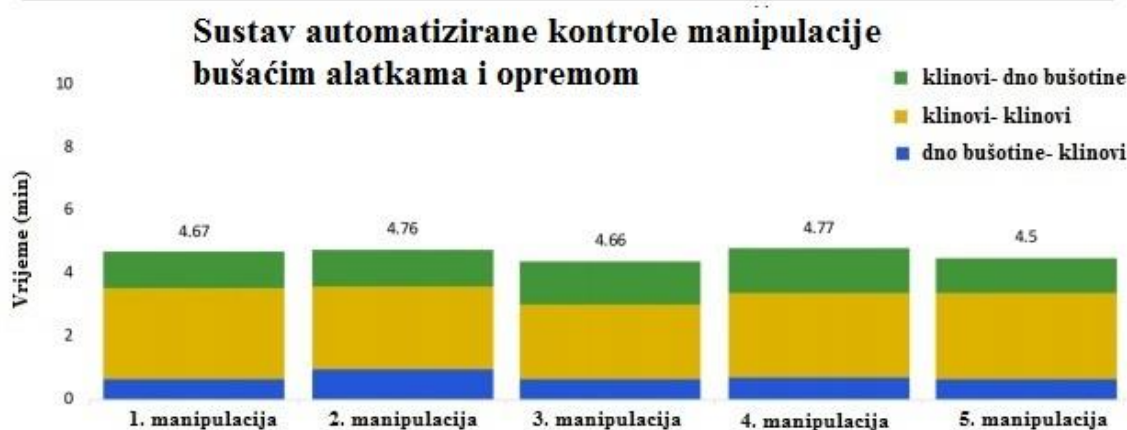
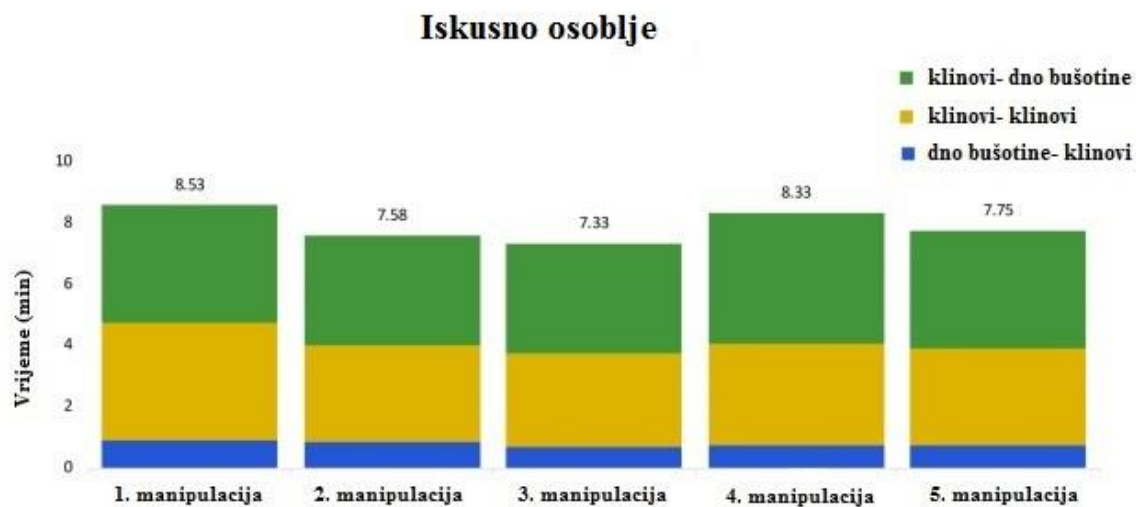
za 14%, odnosno za 10% u odnosu na dimenzije i masu standardog motora snage 1 491 kW (Epmag, 2015).

5.2. Efikasnost dubinskih motora

Prilikom bušenja grma bušotina u bazenu Williston, operator je, da bi povećao efikasnost u bušenju vertikalnog kanala, upotrijebio dubinski motor Ultra XL45 tvrtke Baker Hughes. Rezultat toga bilo je smanjenje vremena bušenja sa 100,5 sati na 79,2 sata, što predstavlja smanjenje za 21 sat ili 21%. Povećala se brzina efikasnosti u bušenju, sa 418 izbušenih metara na dana na 553 metara, što predstavlja povećanje za 33%. U kasnijoj fazi bušenja, odlučeno je da će se postojeća bušotina bušiti s povećanjem kuta otklona od 14° na svakih 30,48 metara duljine kanala bušotine. To je bilo nemoguće upotrebom klasičnih motora, ponajprije zbog njihovih dimenzija. Za obavljanje operacije upotrijebljen je dubinski motor Navi-Drill Curve, tvrtke Baker Hughes, s mogućnošću izrade zakrivljenog kanala s promjerom kuta otklona 11° do 18° na 30,48 metara. To je u konačnici smanjilo broj radnih sati s 31 sat na 22,4 sata, što predstavlja uštedu u vremenu od 28% (World Oil, 2015).

5.3. Efikasnost sustava za manipulaciju

Tvrtka Precision Drilling provela je ispitivanje učinka manipulacije bušačim alatkama usporedbom rada iskusnog osoblja i primjenom sustava automatizirane kontrole manipuliranja alatkama i opreme. Ispitivanje je provedeno koristeći bušaće postrojenje broj 601 na bušotini dubine 4 572 metara, i podijeljeno je u tri kategorije: mjereno je vrijeme potrebno od deaktivacije klinova do spuštanja niza alatki do dna bušotine, vremenski interval između aktivacije klinova i vrijeme od izvlačenja bušačeg niza do aktivacije klinova. U slučaju rada iskusnog osoblja, ukupno vrijeme potrebno za obavljanje svih triju operacija iznosilo je od 7,33 min do 8,53 min. Tijekom manipulacije, upotrebom sustava automatizirane kontrole manipuliranja bušačim alatkama i opremom, vrijeme potrebno za obavljanje svih triju operacija iznosilo je od 4,50 min do 4,77 min. Prema slici 5-4., najveće uštede u vremenu ostvarene su u operaciji spuštanja bušačeg niza do dna bušotine. Najmanje promjene uočene su u vremenskom periodu od izvlačenja bušačkih alatki do aktivacije klinova. Upotrebom sustava automatizirane kontrole manipuliranja bušačim alatkama i opremom u prosjeku je smanjeno vrijeme manipulacije za 41% (Precision Drilling, 2018).



Slika 5-4. Usporedba rada iskusnog osoblja i sustava automatizirane kontrole manipulacije bušaćim alatkama i opremom u procesu manipulacije alatkama (Precision Drilling, 2018).

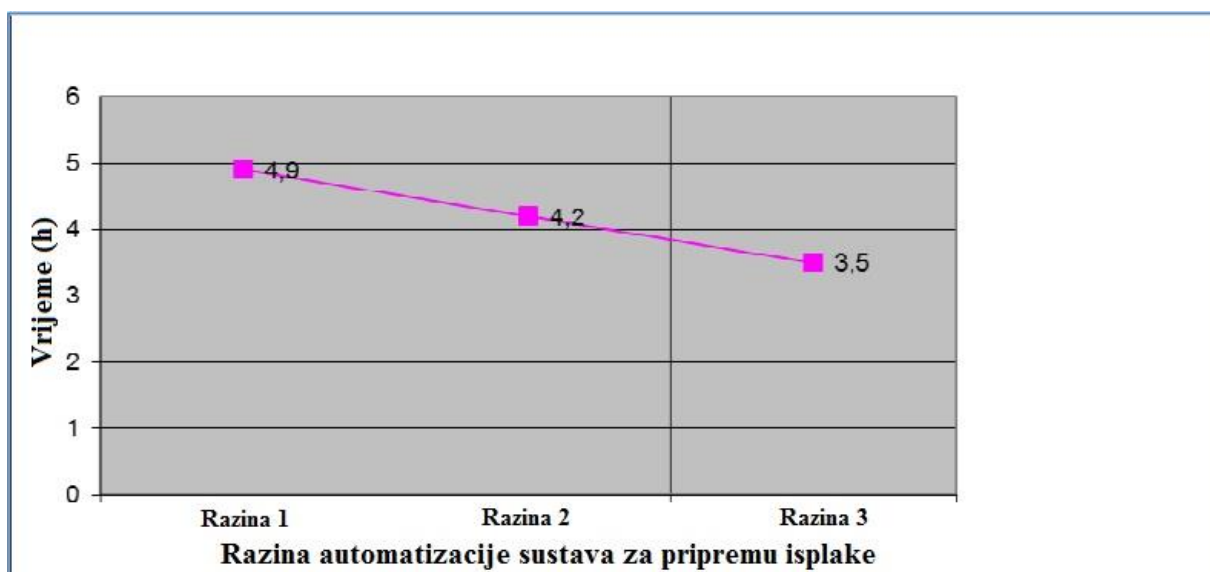
5.4. Efikasnost sustava za uvlačenje alatki u toranj

Tijekom obavljanja operacije manipulacije i odvrtnja navoja bušaćih cijevi, prema podacima dobivenih od servisne kompanije koja radi na području Bliskog istoka, vremenski interval između rada klinova iznosio je 5,45 min. Da bi se povećala efikasnost postrojenja, umjesto klasičnog načina manipulacije alatkama, implementiran je Tesco® automatizirani sustav za manipulaciju cijevnim alatkama, odnosno TAC 45, najveći model tvrtke Nabors. Prilikom izvlačenja 495 komada tubinga promjera 6,0325 cm, vremenski interval između rada klinova iznosio je 2,9 min. Nakon toga pristupilo se odvrtnju i izvlačenju 245 komada

tubinga promjera 13,97 cm. U ovom slučaju, prosjek po komadu tubinga iznosio je 2,94 min. Tako je u prosjeku ostvarena ušteda od 2,55 minute po komadu tubinga, što ukupno iznosi 21 sat ili 45% uštede u odnosu na primjenu konvencionalnih metoda manipulacije alatkama (Nabors, 2018b).

5.5. Efikasnost sustava za pripremu isplake

Korištenjem automatiziranog sustava za pripremu isplake, na primjeru platforme Valhall u Sjevernom moru, postignut je znatan napredak u smanjenju vremena potrebnog za pripremu isplake. Navedeni sustav za pripremu isplake spada u 3. generaciju sustava za pripremu isplake. Kao što je i prije navedeno, operater iz kontrolne sobe nadzire sustav i dozira potrebne količine pojedinih aditiva i materijala potrebnih za izradu isplake na osnovi izmjerenih vrijednosti. Nakon toga, sustav sam pokreće postupak pripreme isplake. Zahvaljujući takvom načinu rada, smanjeno je prolijevanje i nepotrebno gubljenje materijala za pripremu isplake, smanjena je izloženost osoblja buci i prašini te je smanjeno vrijeme potrebno za pripremu isplake. Vrijeme potrebno za pripremu isplake smanjeno je ponajprije zbog mogućnosti sustava za obavljanje simultanih operacija, većeg kapaciteta opreme i spremnika, automatiziranosti sustava, kao i manjeg broj pogrešaka. Na slici 5-5. vidljivo je da je prosjek za pripremu isplake na 1. razini razvoja sustava 4,9 sati, na 2. razini 4,2 sati, dok se na 3. razini smanjuje na 3,5 sati. To predstavlja smanjenje od gotovo 1,4 sata, odnosno smanjenje vremena za 29%. Također, ovim sustavom emitira se do 0,5 mg prašine manje na 1 m³ pripremljene isplake.

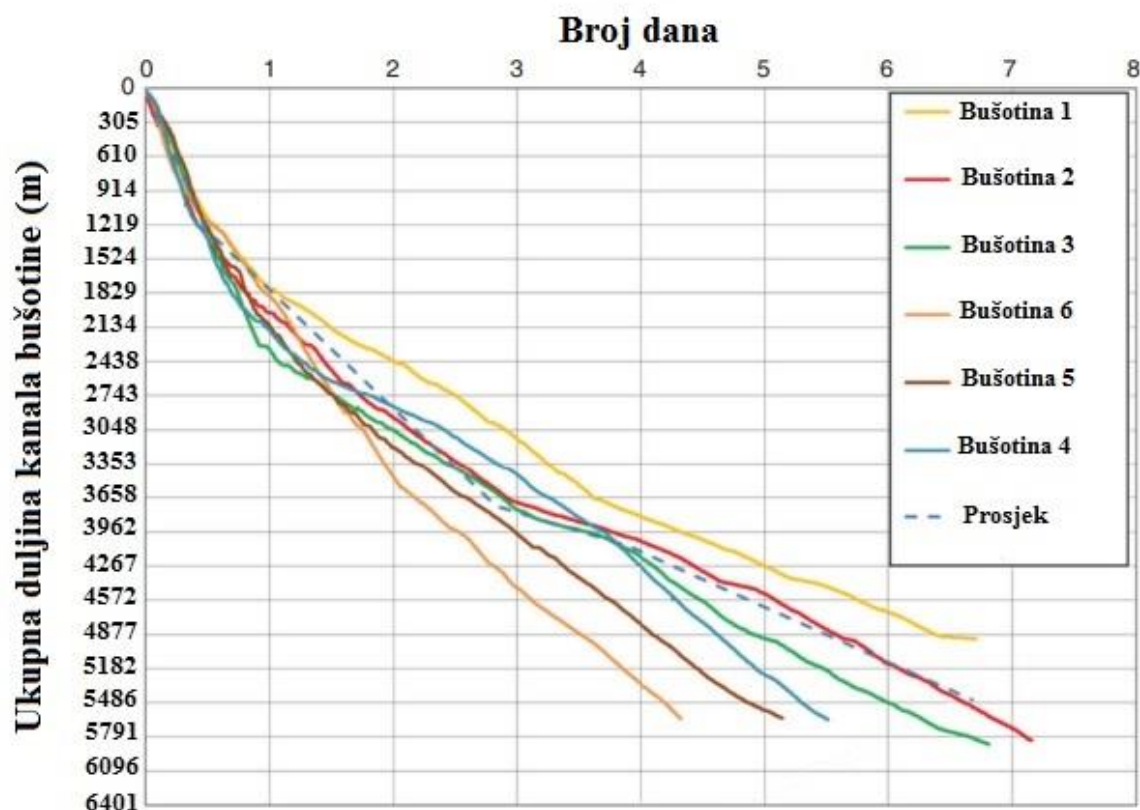


Slika 5-5. Vrijeme potrebno za pripremu isplake obzirom na razinu automatizacije sustava za pripremu isplake (Kvame i dr., 2011).

5.6. Primjeri povećanja efikasnosti automatiziranih kopnenih bušaćih postrojenja

1. primjer

U kolovozu 2014. godine, tvrtke NOV i ConocoPhillips pokrenule su eksperiment bušenja deset horizontalnih bušotina duljine kanala 3 660 metara, s lateralnim kanalima duljine 1 980 metara. U početku su izbušene četiri bušotine bez korištenja automatizirane opreme s ciljem utvrđivanja cijene bušenja, napretka dlijeta i uspješnosti procesa bušenja. Preostalih šest bušotina izbušeno je automatiziranim postrojenjem tvrtke ConocoPhillips slabijih performansi i korištenjem računalnog sustava bušenja tvrtke NOV. U sastavu postrojenja bili su uključeni: uređaj za stabilizaciju bušačkog niza prilikom nastanka vibracija, uređaj za kontrolu opterećenja na dlijeto i programska podrška sustava automatiziranog bušenja s prikazom svih parametara bušenja. Prosječan broj dana potreban za bušenje šest bušotina iznosio je 6,5 dana. U usporedbi s bušenjem četiri bušotine bez primjene automatiziranih opreme, to predstavlja uštedu u vremenu od 37%, odnosno od 43% ako se uzme u obzir da nije bilo pogrešaka i zastoja u bušenju (Jacobs, 2015). Na slici 5-6. nalazi se grafički prikaz broja potrebnih dana za bušenje svake bušotine automatiziranim sustavom, kao i iscrtana linija koja predstavlja prosjek pri bušenju svih šest bušotina.

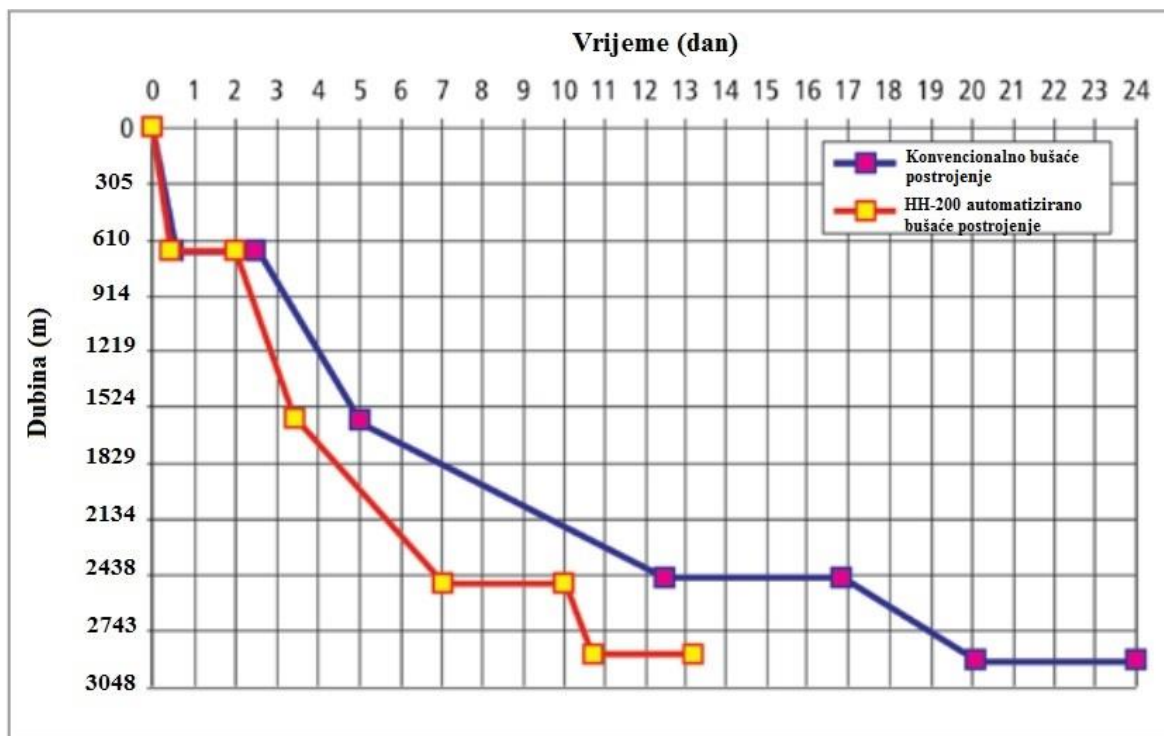


Slika 5-6. Prikaz odnosa ukupne izbušene duljine kanala bušotine i broja dana za šest bušotina izbušenih primjenom automatiziranog bušačeg postrojenja tijekom pokusa izvedenog od tvrtke ConocoPhillips i tvrtke NOV (Jacobs, 2015)

2. primjer

Kopno bušaće postrojenje HH-200 predstavlja suvremeno automatizirano bušaće postrojenje tvrtke Drillmec. Ovo postrojenje pokreće diesel-elektirčni sustav s četiri generatora snage 910 kW, što predstavlja ukupnu snagu od 3 640 kW. Snaga hidrauličkog sustava dizalice iznosi 932 kW, s maksimalnom nosivošću od 200 t. Isplačni sustav sadrži tri isplačne sisaljke (jedna je rezervna) snage 932 kW i maksimalnog radnog tlaka od 345 bar. Uvidom u sliku 5-7., vidljivo je da je upotrebom HH-200 postrojenja konačna dubina bušotine od 2 896 metara postignuta za 13 dana, u usporedbi s konvencionalnim

postrojenjem kojemu je bilo potrebno 24 dana. Razlika je ukupno 11 dana, što predstavlja uštedu u vremenu od 46% primjenom HH-200 postrojenja.



Slika 5-7. Usporedba rada automatiziranog bušaćeg postrojenja HH-200 i konvencionalnog postrojenja kod izrade sličnih bušotina (Drillmec, 2018).

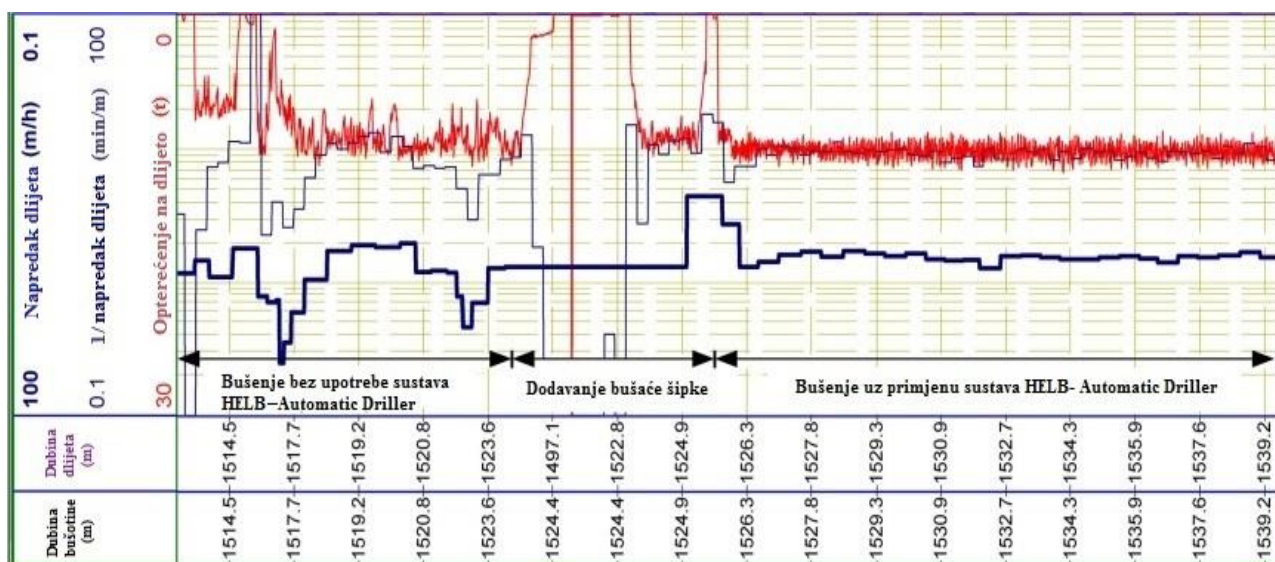
3. primjer: Primjena automatiziranog sustava bušenja i prigušenja vibracije na konvencionalnim kopnenim bušaćim postrojenjima

U suradnji Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu i kompanije HELB Ltd., Croatia, provedeno je istraživanje u implementaciji automatiziranog sustava za bušenje i prigušenje torzijskih vibracija na starijim generacijama bušaćih garnitura tvrtke CROSCO. Upravljanje procesom bušenja peko dizalice zahtijeva ručno upravljanje aktuatorom mehaničke kočnice na bubnju dizalice za posrednu regulaciju napretka bušenja i opterećenja na dlijeto. To često dovodi do promjena u napretku bušenja i opterećenju na dlijeto, što rezultira povećanim vibracijama i naprezanju u nizu bušaćih alatki, pojavi stick-slip efekta na bušaćem alatu, te posljedično do skraćenja životnog vijeka bušaćeg alata i smanjenja kvalitete izrađene bušotine. Radi sprječavanja takvih posljedica, uveden je sustav automatiziranog bušenja i

prigušenja torzijskih vibracija. Ovaj sustav temelji se na modifikacijama sustava dizalice i implementaciji (Cipek 2017):

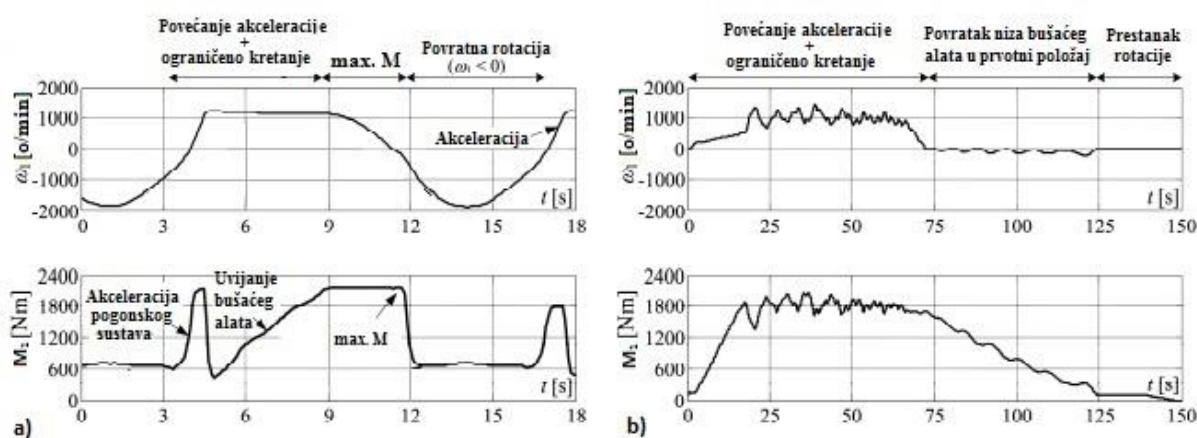
- servopneumatskog ili servohidrauličkog sustava kočnica;
- električnog ili pneumatskog servo sustava aktuatora mehaničke kočnice ili
- korištenjem glavnog ili dodatnog elektromotora dizalice za kontrolu brzine okretaja bubnja dizalice.

Kao rezultat navedenog istraživanja razvijen je HELB- Automatic DrillerTM sustav. Temelji se na upotrebi elektromotora povezanog s aktuatorom mehaničke kočnice čeličnim užetom i koloturnim sustavom te upotrebi povratne opruge, koja djeluje kao uređaj za opterećenje nužno za dvosmjernu kontrolu i sigurnosne mjere. Na slici 5-8. prikazana je usporedba bušenja bez i uz primjenu sustava HELB- Automatic DrillerTM. Vidljivo je da su promjene, uz primjenu navedenog sustava, oscilacije u napretku bušenja i opterećenja na dlijeto minimalne, dok se bez primjene ovog sustava postižu velike razlike u napretku bušenja i opterećenja na dlijeto što dovodi ponajprije do povećanog trošenja dlijeta, a zatim i ostatka bušačkog alata. Primjenom sustava HELB- Automatic DrillerTM smanjene su smetnje u prijenosu momenta torzije po RMS (engl. *Root Mean Square*) vrijednosti za gotovo 50%. Također, prosječna vrijednost opterećenja na dlijeto, tijekom bušenja, povećana je za 15%.



Slika 5-8. Bušenje bez i uz primjenu sustava HELB- Automatic DrillerTM (Cipek, 2017)

Rad i efikasnost upotrebe HELB- Automatic Driller™ sustava ispitana je i u slučaju pojave povratne rotacije niza bušačkog alata tijekom zaglave. Tijekom zaglave bušačkog alata, povećava se moment torzije radom motora vršnog pogona. Nakon postizanja maksimalnog momenta torzije, dolazi do opadanja vrijednosti momenta torzije. Ponovno uvećani moment torzije uzrokuje okretanje osovine motora u suprotnom smjeru, što uzrokuje rotaciju niza bušačkog alata u suprotnom smjeru. Kod upotrebe sustava HELB- Automatic Driller™, pomoću algoritma za sprječavanje pojave povratne rotacije bušačkog niza, postupno se povećava i smanjuje kutna brzina i moment torzije u jednom, odnosno u drugom smjeru. To uzorkuje kontroliranu rotaciju alata u suprotnim smjerovima. Na kraju dolazi do povratka niza bušačkog alata u stanje mirovanja i prestanka rotacije. Na slici 5-9. nalaze se rezultati ispitivanja kutne brzine i momenta torzije tijekom efekta obrnute rotacije bušačkog niza u uvjetima zaglave bez i s upotrebom sustava za sprječavanje povratne rotacije. U slučaju bez primjene navedenog sustava, vidljive su velike oscilacije u promjeni kutne brzine i momenta torzije što može uzrokovati oštećenje i smanjenje životnog vijeka bušačkog alata.



Slika 5-9. Usporedba uvjeta kontrole niza bušačkog alata bez (a) i s upotrebom sustava za sprječavanje povratne rotacije niz bušačkih alatki (b) (Cipek, 2017)

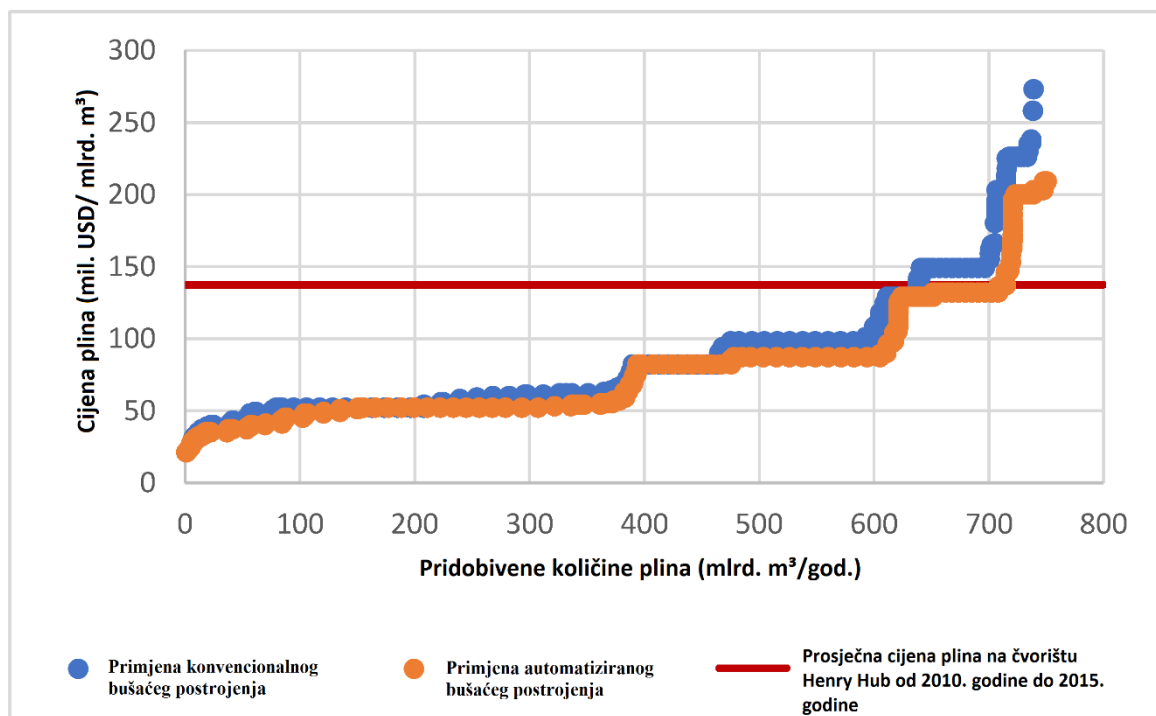
6. EKONOMSKI POKAZATELJI PRIMJENE AUTOMATIZIRANIH BUŠAĆIH POSTROJENJA

Ideja o automatizaciji bušaćih postrojenja aktualna je još od šezdesetih godina 20. stoljeća, s glavnim ciljem smanjenja troškova bušenja i povećanja efikasnosti bušenja. No, obzirom da tehnologija u to doba nije bila usavršena i servisne kompanije su bile vezane dnevnim ugovorom, to naprosto nije bilo moguće ostvariti. Također, određeni dio stručnog osoblja kritizirao je ideju o automatizaciji jer bi to dovelo do manje angažiranosti osoblja u radu, što bi smanjilo mogućnost stjecanja znanja i iskustva. Rezultat toga bilo bi nestručno reagiranje u slučaju incidenata i kvarova. S vremenom je automatizacija postajala sve prisutnija u procesima bušenja. Danas se automatizirani uređaji najčešće koriste na odobalnim postrojenjima, poglavito u dubokim morima i morima s ekstremnim uvjetima rada kao što je Sjeverno more, ali i na kopnu, ponajviše na području SAD-a.

6.1. Usporedba uporabe automatiziranih i konvencionalnih postrojenja u procesu bušenja

Radi utvrđivanja ekonomske učinkovitosti primjene automatiziranih postrojenja za bušenje, Institut za održivo gospodarenje plinom na Kraljevskom koledžu u Londonu proveo je istraživanje na temelju podataka dobivenih tijekom izrade bušotina u plinskim ležištima na području SAD-a za razdoblje od 2010. godine do 2015. godine. Tijekom izrade studije, primijenjen je tehno-ekonomski model DYNAAMO (engl. *Dynamic Upstream Gas Model*) za kvantitativnu procjenu utjecaja nižih troškova bušenja na plinsku industriju. Kao rezultat pada cijene nafte u 2015. godini, pale su i cijene najma postrojenja za bušenje. Tako je prosječna cijena rada odobalnog bušaćeg postrojenja u 2015. godini iznosila 260 000 USD, u odnosu na 2014. godinu kada je iznosila 430 000 USD. Prosječna cijena rada kopnenog bušaćeg postrojenja smanjila se s 18 750 USD tijekom 2014. godine, na 15 730 USD 2015. godine. Rezultat smanjenja cijene najma doveo je do otpuštanja određenog broja radnika i do automatizacije postrojenja. Analize su pokazale da se primjenom automatiziranih postrojenja smanjuju kapitalni troškovi do 50%. Smanjenje troškova bušenja posebno je vidljivo kod novootkrivenih ležišta plina u šejlovima i niskopropusnim pješčenjacima (Mdpi, 2018).

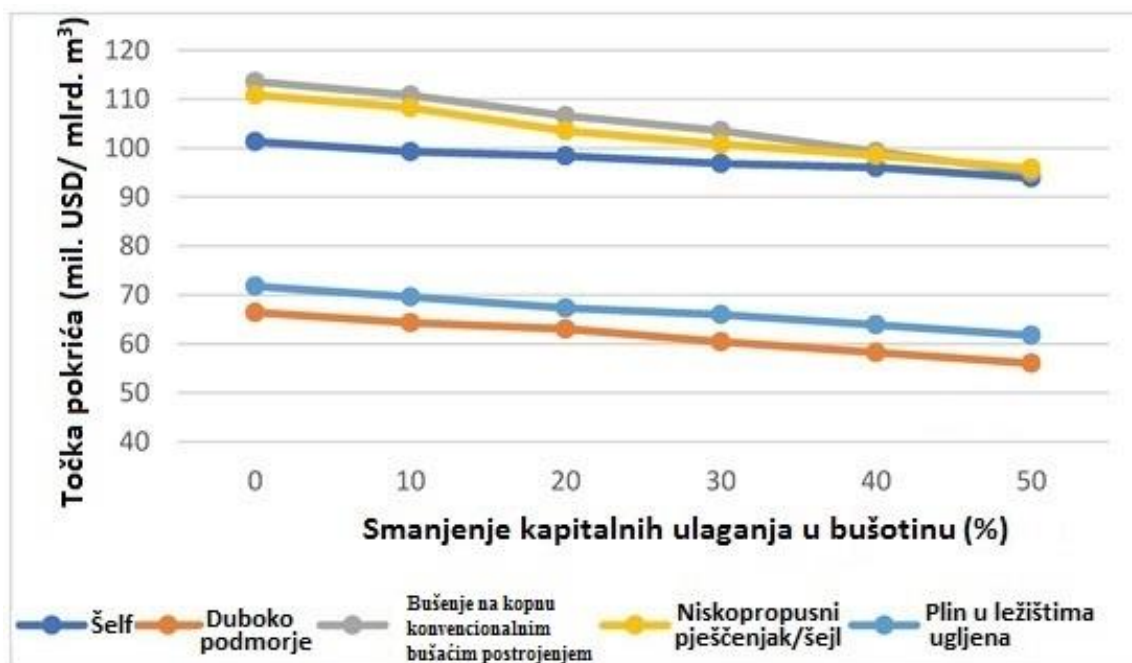
Na slici 6-1. jasno je vidljiva isplativost korištenja automatiziranih u odnosu na konvencionalna bušaća postrojenja. Na slici je dan odnos cijene plina u odnosu na pridobivene količine plina, iz čega proizlazi točka pokrića. Točka pokrića je točka u kojoj su ukupni prihodi jednaki ukupnim troškovima, tj. dobit je jednaka nuli (Plaviured, 2017).



Slika 6-1. Cijena plina u odnosu na pridobivene količine plina iz ležišta na kojem su bušotine izrađene primjenom konvencionalnih, odnosno automatiziranih bušaćih postrojenja (Mdpi, 2018)

Prilikom usporedbe iznosa točke pokrića u ovisnosti o smanjenju kapitalnih ulaganja, korištena je vrijednost točke pokrića. Na slici 6-2. uspoređene su točke pokrića za ležišta plina u šelfovima, dubokom podmorju, nepropusnim pješčenjacima, šejlovima, ležištima ugljena, bušena primjenom automatiziranih bušaćih postrojenja, i ležišta plina na kopnu bušena konvencionalnom bušaćim postrojenjima. Vidljivo je da je najveća točka pokrića kod kopnenih ležišta bušenih konvencionalnim bušaćim postrojenjima, koja se kreće u rasponu od 114 mil. USD na mlrd. m³ plina do 95 mil. USD na mlrd. m³ plina pri smanjenju kapitalnih ulaganja od 50%. Najniže točke pokrića imaju ležišta ugljena koja sadrže plin i ležišta plina u dubokom podmorju, s iznosom od 72 mil. USD na mlrd. m³ plina, odnosno

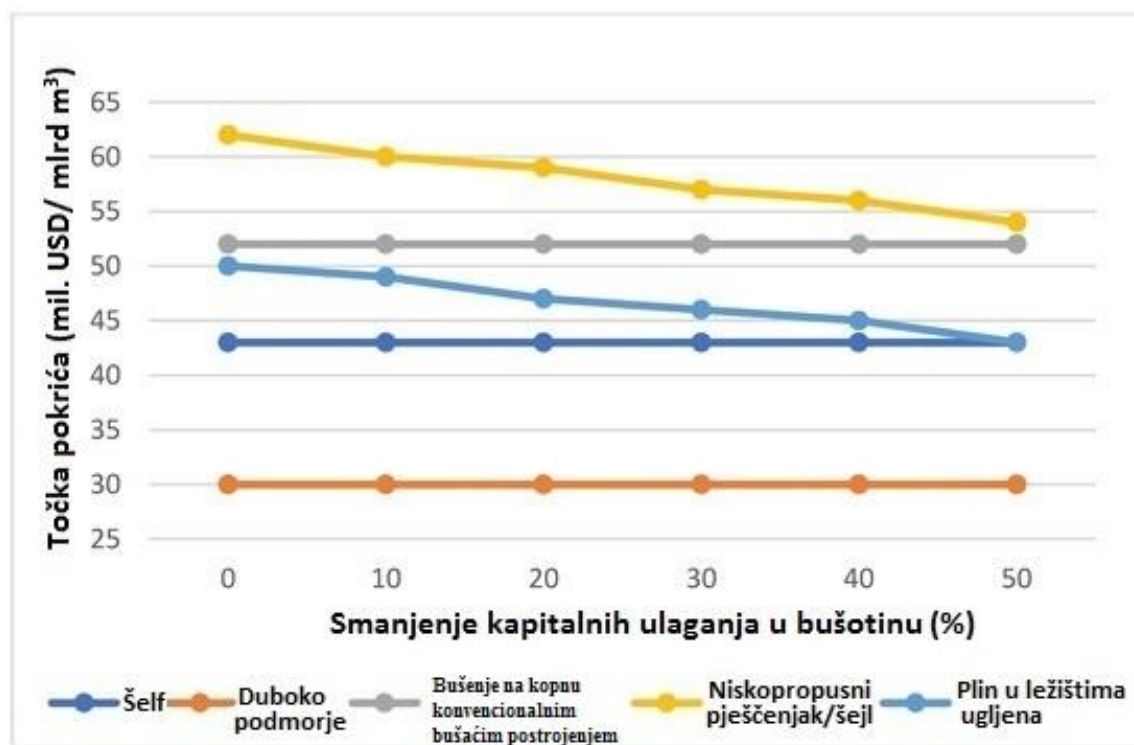
68 mil. USD na mlrd. m³ plina do 62 mil. USD na mlrd. m³ plina, odnosno 57 mil. USD na mlrd. m³ plina pri smanjenju kapitalnih ulaganja za 50%.



Slika 6-2. Odnos točke pokrića o smanjenju kapitalnih ulaganja ovisno o primjeni konvencionalnog, odnosno automatiziranog bušaćeg postrojenja u različitim vrstama ležišta, prije početka komercijalnog pridobivanja plina (Mdpi, 2018).

Kasnije, u srednjoj fazi eksploatacije polja, ti odnosi se mijenjaju. Na slici 6-3., vidljivo je da ležišta u dubokom podmorju imaju najmanju točku pokrića s obzirom da su takva ležišta velika i ne zahtijevaju veliki broj bušotina. Kod takvih ležišta, točka pokrića iznosi 30 mil. USD na mlrd. m³ plina. Točka pokrića u ležištima koja se nalaze u šelfu ima konstantnu vrijednost od 43 mil. USD na mlrd. m³ plina. U ležištima ugljena koja sadrže plin, točka pokrića je promjenjiva i kreće s 50 mil. USD na mlrd. m³ plina do 43 mil. USD na mlrd. m³ plina, pri smanjenju kapitalni ulaganja od 50%. Prilikom bušenja konvencionalnim bušaćim postrojenjima na kopnu i automatiziranim postrojenjima u niskopropusnim pješčenjacima, odnosno šejlovima, točka pokrića je najviša. Za konvencionalna bušaća postrojenja na kopnu, ona je približno jednaka i iznosi 52 mil. USD na mlrd. m³ plina. Kod niskopropusnih pješčenjaka, odnosno šejlova, vrijednost točke pokrića kreće se u granicama od 62 mil. USD

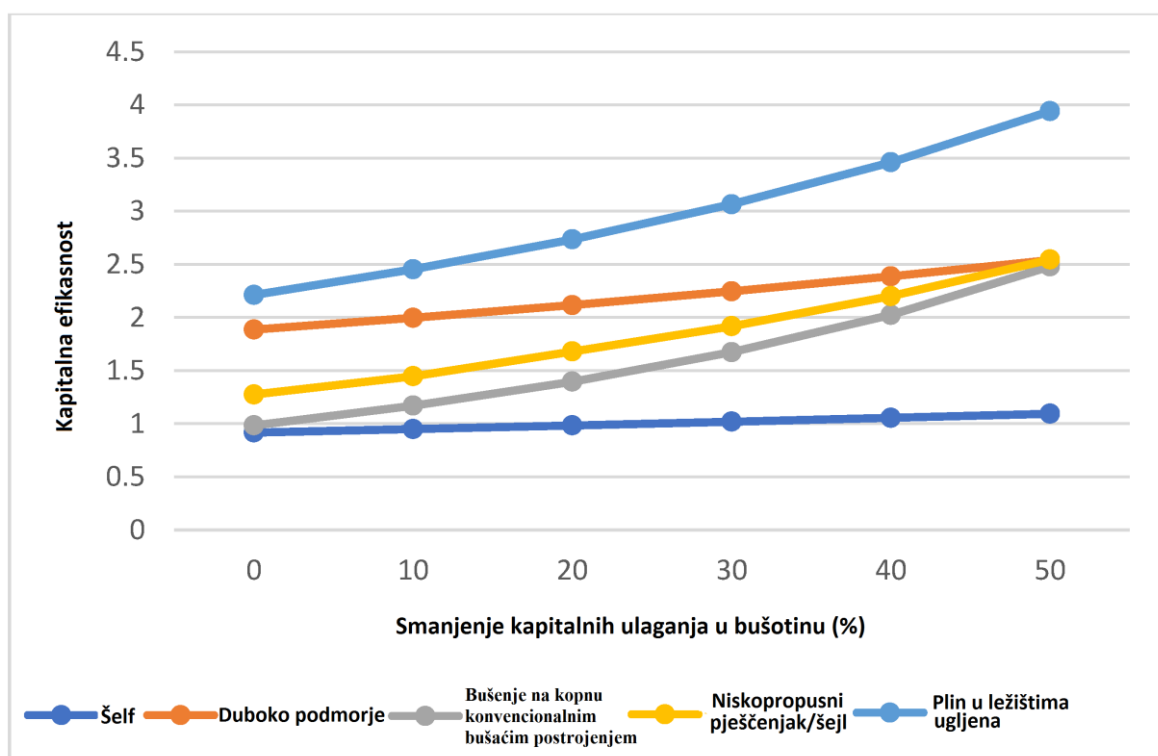
na mlrd. m³ plina do 54 mil. USD na mlrd. m³ plina pri smanjenju kapitalnih ulaganja od 50%.



Slika 6-3. Odnos točke pokrića o smanjenju kapitala ovisno o primjeni konvencionalnog, odnosno automatiziranog bušaćeg postrojenja u različitim vrstama ležišta u zreloj fazi eksploatacije (Mdpi 2018).

Na slici 6-4., uspoređene su vrijednosti kapitalne efikasnosti u odnosu na smanjenje kapitalnih ulaganja u bušotinu. Kapitalna efikasnost predstavlja odnos između visine izdataka koje poduzeće snosi i količine novaca koje koristi za proizvodnju robe, odnosno usluge (Businessdictionary, 2018). Usporedbom povećanja kapitalne efikasnosti, u odnosu na kapitalno ulaganje, vidljivo je da je povećanje kapitalne efikasnosti najveće kod bušenja na kopnu upotrebom konvencionalnih bušaćih postrojenja. Razlog tomu leži u činjenici da su kapitalni troškovi kod nekonvencionalnih ležišta veći od onih kod konvencionalnih ležišta plina, odnosno ugljikovodika. Kod konvencionalnih bušaćih postrojenja, većina kapitalnih ulaganja vezana je uz početne faze projekta. Prema slici 6-4., vidljivo je da povećanje

kapitalne efikasnosti korištenjem konvencionalnih bušačkih postrojenja na kopnu raste za 44% pri smanjenju kapitalnih ulaganja za 50%, kod slabopropusnih pješčenjaka i šejlova za 32%, dok je kod ostalih ležišta povećanje neto sadašnje vrijednosti manje od 44%. Prema svim procjenama i prosječnoj cijeni plina čvorišta Henry Hub od 141 mil. USD na mlrd. m³ plina za razdoblje od 2010. godine do 2015. godine, uštede u plinskoj industriji, primjenom automatizacije u bušenju, iznose 4,4 milijardi USD.



Slika 6-4. Odnos kapitalne efikasnosti i smanjenja kapitalnih ulaganja u bušotinu na primjeru različitih ležišta bušena konvencionalnim, odnosno automatiziranim bušačkim postrojenjima (Mdpi, 2018)

6.2. Cijena postrojenja i rada postrojenja

Cijena rada bušačkog postrojenja ovisi o ponudi i potražnji, specifikacijama i mogućnostima postrojenja i opreme kao što je snaga pogonskih motora, isplačnih sisaljki, dizalice, kompleksnosti operacija, itd. U tablici 6-1. i tablici 6-2., predstavljene su cijene dnevnog rada bušačkih postrojenja, ovisno o snazi pogonskog motora na području SAD-a, odnosno na području Bliskog istoka. Vidljivo je da se povećanjem snage pogonskih motora povećava

cijena rada postrojenja. Tako je za postrojenja na području SAD-a, pogonske snage manje od 746 kW cijena dnevnog rada manja od 7 000 USD, dok se za postrojenja visoke pogonske (>1 490 kW) snage cijena kreće od 16 000 USD/dan do 26 000 USD/dan. Cijena rada kopnenog bušačkog postrojenja, snage veće od 1 490 kW, na području Bliskog istoka je od 25 000 USD/dan do 35 000 USD/dan, što predstavlja povećanje iznosa od 28% do 36% u odnosu na postrojenja iste snage u SAD-u. Glavni razlog ove razlike leži u velikoj potražnji za postrojenjima na području Bliskog istoka.

Tablica 6-1. Cijena rada kopnenog bušačkog postrojenja u SAD-u (Scmdaleel, 2018)

Pogonska snaga (kW)	Cijena rada kopnenog bušačkog postrojenja (USD/dan)	
>1490	16 000	26 000
1119	12 000	17 000
746	7 000	12 000
>746		<7 000

Tablica 6-2. Cijena rada kopnenog bušačkog postrojenja na Bliskom istoku (Scmdaleel, 2018)

Pogonska snaga (kW)	Cijena rada kopnenog bušačkog postrojenja (USD/dan)	
>1490	25 000	35 000
1119	17 000	21 000
746	12 000	19 000
>746		<10 000

Što se tiče cijena kopnenih bušačkih postrojenja, one se kreću od 4 mil. USD sve do 25 mil. USD. Tako je cijena moderniziranog konvencionalnog postrojenja za bušenje sa sustavom elektromotora izmjenične struje snage 1 119 kW od 4 mil. USD do 8 mil. USD, a novog

postrojenja iste snage, pogonjenog sustavom elektromotora istosmjerne struje cijena od 12 mil. USD do 15 mil. USD. Cijena postrojenja sa sustavom elektromotora istosmjerne struje i snage 1 491 kW kreće se u rasponu od 16 mil. USD do 21 mil. USD. Najskuplju varijantu predstavlja novo postrojenje pogonjeno elektromotorima izmjenične struje snage 2 237 kW, čija je cijena od 20 mil. USD do 25 mil. USD (Scmdaleel, 2018).

7. PRIMJENA AUTOMATIZIRANIH BUŠAČIH POSTROJENJA U BUDUĆNOSTI

Kimberlite, tvrtka za istraživanje tržišta u naftnom i plinskom sektoru, provela je istraživanje i intervjuirala 269 bušačkih inženjera i menadžera u preko 100 naftnih i plinskih kompanija na temu upotrebe automatiziranih postrojenja za bušenje u narednih pet godina. Prema rezultatima, čak 51% bušotina na području Kanade bit će bušeno uz primjenu automatiziranih bušačkih postrojenja. Slijedi Meksički zaljev s 49% te SAD s 46%. Na svjetskoj razini, udio automatiziranih bušačkih postrojenja u izradi bušotina iznosit će 41%. Predviđa se da će na moru biti više izbušenih bušotina (36%) u odnosu na broj bušotina na kopnu (31%) primjenom navedene tehnologije. Prilikom istraživanja, 21% operatora izjasnilo se da će za 5 godina izvoditi 100% operacija bušenja primjenom automatiziranih bušačkih postrojenja, dok se 26% izjasnilo da nemaju u planu uvoditi u upotrebu automatizirana bušačka postrojenja. Obzirom na prednosti u korištenju automatiziranih bušačkih postrojenja, kao najvažniji cilj odabrano je povećanje efikasnosti (43%). Nakon toga, kao što je vidljivo na slici 7-1., slijedi učinkovitija izrada bušotine (30%), smanjenje vremena bušenja i troškova (20%), povećanje sigurnosti osoblja (14%), pristup podacima u stvarnom vremenu (11%), smanjenje erupcija i dotoka (10%), smanjenje grešaka osoblja (10%), povećanje napretka dlijeta (6%), konzistentnost bušotina (5%), smanjenje neproduktivnog vremena (4%), smanjenje kvarova (4%) i smanjenje potrebe za radom osoblja (4%), itd.



Slika 7-1. Razlozi korištenja automatiziranih bušačkih postrojenja (Kimberlite, 2017)

8. ZAKLJUČAK

U svijetu se još uvijek koriste konvencionalna postrojenja u procesu bušenja na kojima se znatan dio operacija obavlja uz direktno sudjelovanje osoblja. Pri takvim uvjetima rada osoblje na postrojenju izloženo je opasnostima od ozljeda zbog rada na malom prostoru okruženom robusnim i teškim alatima i uređajima, nespretnog i neprofesionalnog rukovanja opremom, pada predmeta ili gotovo cijele konstrukcije. Obzirom da takvi poslovi zahtijevaju konstantno ponavljanje istih postupaka, s vremenom dolazi do zamora ljudskog organizma i smanjenje koncentracije. Rezultat toga može biti neopreznost koja dovodi do ozljeda i oštećivanje opreme što dovodi do zastoja u radu, a samim time do povećanih troškova. Također, neki slučajevi rezultirali su smrtnim posljedicama. No, rad na postrojenju postupno je olakšan uvođenjem u upotrebu mehaniziranih uređaja. Tijekom vremena došlo je do iscrpljivanja konvencionalnih i plitkih ležišta ugljikovodika i do povećane potražnje za ugljikovodicima, što je rezultiralo istraživanjem, bušenjem i pridobivanjem ugljikovodika iz nekonvencionalnih ležišta, ležišta na većim dubinama pri uvjetima velikog ležišnog tlaka i temperature te bušenjem u područjima s ekstremnom klimom i uvjetima rada. Troškovi rada i bušenja na navedenim područjima i uvjetima rada dodatno poskupljuju i osložnjuju obavljanje procesa bušenja. Uz to, sve se više pažnje posvećuje sigurnosti osoblja na radu, povećanju efikasnosti, a samim time i povećanju prihoda. Zahvaljujući razvoju tehnologije izrade bušotina, ispunjenje tih zahtjeva i svladavanje raznih prepreka je moguće. Uvođenjem računala, automatiziranih uređaja i strojeva u rad bušaćeg postrojenja eliminirala se potreba za direktnim sudjelovanjem osoblja u obavljanju pojedinih operacija. Na najmodernijim postrojenjima, osoblje je smješteno u kontrolne sobe gdje nadzire i pokreće operacije pomoću računala, odnosno preko panela. Rezultat toga je smanjenje broja osoblja, veća sigurnosti, ali i potreba za školovanim kadrom. U budućnosti se očekuje napredak u razvoju tehnologije te će u primijeni biti potpuno samostalna postrojenja čijim će se radom moći upravljati daljinski, bez potrebe za prisutnošću na postrojenju. To će dovesti do znatnog povećanja efikasnosti, sigurnosti, povećanju prihoda, a samim time i mogućnošću bušenja u područjima i uvjetima u kojima je to danas nezamislivo.

9. LITERATURA

1. Aker Solutions, 2012. *AkerSolutions Drilling technologies*, katalog tvrtke Aker Solutions u digitalnom obliku
2. Cipek, M., Jurišić G., Pavković, D., Šprljan P., 2017. *Some recent results of automated drilling and torsional vibration active damping R&D aimed at mature drilling systems retrofitting*. Nafta i plin, 37 (151), str. 110.-119.
3. Drillemec, 2018. *Automated Hydraulic Drilling Rigs, HH Series*. Katalog tvrtke Drillemec u digitalnom obliku.
4. Elhamid Ali, O. A., Kyaw, H., AlRemeithi, A. i Elrefai, M. 2016. *NDC Rig Walking System: Pioneering initiative Enabling Safer Rig Move in the Middle East*. Prezentirano na Middle East Drilling Technology conference, održanoj u Abu Dhabiju, UAE, 26.-28. siječanj. SPE/IADC-178253-MS.
5. Eustes, A. W., 2007. *The Evolution of Automation in Drilling*. Prezentirano na SPE Technical Conference and Exhibition, održano u Anaheimu, Kalifornija, SAD, 11.-14. studeni. SPE 111125.
6. Gupta, S., 2006. *Rig Automation-Altering the Visage of the Oil Industry*. Prezentirano na IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, održanou Bangkoku, Tajland, 13.-14. studeni. IADC/SPE 100052.
7. Kvame, O., Blom-Jensen, B., Bastesen, Y. i Sandvik, J. E., 2011. Kvame, O., Blom-Jensen, B., Bastesen, Y. i Sandvik, J. E., 2011. *Automation of the Drilling Fluid Mixing Process, Field Experiences and Development from North Sea Operations*. Prezentirano na SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, održano u Amsterdamu, Nizozemska, 1.-3. ožujak. SPE/IADC 139943.
8. Levett, B., 2004. *Improved Safety of Rig Automation with Remote Monitoring and Diagnostics*. Prezentirano na The Seventh SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, održano u Calgaryju, Alberta, Kanada, 29.-31. ožujak. SPE 86600.
9. Matanović D., 2007. *Tehnika izrade bušotina, priručnik s primjerima*, Zagreb: Školska knjiga
10. NOV, 2008. *PS-15/16, 2008*. Priručnik tvrtke NOV u digitalnom obliku

11. Precision Drilling, 2018. investitorska prezentacija tvrtke Precision Drilling u digitalnom obliku
12. TSC, 2015. *Tubular & Riser Handling Equipment*, 2015. Katalog tvrtke TSC u digitalnom obliku

Internetski izvori

1. Bentec, 2018.
URL: https://www.bentec.com/pdf_files/rigwalkingsystem_272_1.pdf (12.12.2018.)
2. Britannica, 2015.
URL: <https://www.britannica.com/biography/Edwin-Laurentine-Drake> (1.12.2018.)
3. Businessdictionary, 2018.
URL: <http://www.businessdictionary.com/definition/capital-efficiency.html>
4. CanElson, 2015
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=mcZJR7kyZtE> (12.12.2018.)
5. Citadel, 2014.
URL: <https://twitter.com/citadelldrilling/status/499269118004965377> (1.12.2018.)
6. Dayang, 2018.
URL: https://dayangpetroleum.en.ecplaza.net/products/oil-drilling-rigs-such-as-zj30_1635893 (1.12.2018.)
7. Drilling Contractor, 2009.
URL: <http://www.drillingcontractor.org/performance-drilling-definition-benchmarking-performance-qualifiers-efficiency-and-value-1977> (28.12.2018.)
8. Drillmec, 2015.
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=bBjYETwY7N4> (9.12.2018.)
9. EIA, 2010.
URL: https://www.eia.gov/workingpapers/pdf/drilling_efficiency.pdf (28.12.2018.)

10. Epmag, 2015.

URL: <https://www.epmag.com/high-power-density-motors-enable-rigs-drill-more-efficiently-829721#p=full> (28.12.2018.)

11. Fet, 2018.

URL: <https://www.f-e-t.com/products/drilling-and-subsea/drilling/tubular-handling/catwalks> (7.12.2018.)

12. Halliburton, 2017.

URL: https://www.halliburton.com/content/dam/ps/public/bar/contents/Data_Sheets/web/Sales_Data_Sheets/H011608.pdf (13.12.2018.)

13. Helpsystems, 2018.

URL: <https://www.helpsystems.com/resources/guides/automated-operations-5-benefits-your-organization> (4.12.2018.)

14. Jacobs, T. 2015. *Automated Drilling Technologies Showing Promise*. URL: https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-0615-0050-JPT?sort=&start=0&q=jacobs+automated+drilling&from_year=&peer_reviewed=&published_between=&fromSearchResults=true&to_year=&rows=25# (30.12.2018.)

15. Kimberlite, 2017.

URL: <https://www.kimberliteresearch.com/single-post/2017/06/21/Automated-Drilling-Poised-to-Grow-Over-Next-5-Years> (2.1.2019.)

16. MDPI, 2018

URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/9/2241/htm#B19-energies-11-02241> (30.12.2018.)

17. Mhwirth, 2017.

URL: http://mhwirth.com/wp-content/uploads/pdf/2017-08_Vertical-Pipe-Handling_final.pdf (11.12.2018.)

18. Nabors, 2018a

URL: <https://www.nabors.com/equipment/automated-surface-equipment/automated-catwalks/padwalker-hydraulic-ramp-pivot> (7.12.2018.)

19. Nabors, 2018b

URL: <https://www.nabors.com/sites/default/files/resources/Automated-Catwalks.pdf> (30.12.2018)

20. Nationaldriller, 2014

URL: <https://www.nationaldriller.com/drilling-history> (1.12.2018.)

21. NCE, 2014.

URL: <https://www.newcivilengineer.com/deep-drilling-first-for-chinese-shale-gas/8664438.article> (7.12.2018.)

22. Nkanza, N., Ding, F., Qiaolei, S. i Yiliu, T. 2018. *Technology and Developing Trends of Automatic Catwalk in China's Drilling Rigs*, 6 International Journal of Scientific Research and Management. URL: <https://www.ijser.in/index.php/ijser/article/view/1638> (7.12.2018.)

23. NOV, 2010.

URL: https://www.nov.com/Segments/Rig_Technologies/Rig_Equipment/Land/Handling_Tools/Power_Slips/Power_Slip_Frame/Power_Slip_Frame.aspx (11.12.2018.)

24. NOV, 2013.

URL: <https://www.atlanticoilfieldsurplus.com/product-pagenew-nov-varco-iron-roughneck-ar-3200-ir> (11.12.2018.)

25. NOV, 2016.

URL: https://www.nov.com/Segments/Rig_Technologies/Rig_Equipment/Offshore/Pipe_Handling/Horizontal_Pipe_Handling/Robotic_Arms/UHT_1200.aspx (11.12.2018.)

26. OGJ, 2015.

URL: <https://www.ogj.com/articles/print/volume-88/issue-16/in-this-issue/drilling/equipment-available-for-automating-rig-operations.html> (2.12.2018.)

27. OE digital, 2016.

URL: <https://www.oedigital.com/news/449819-automating-drilling-fluid-analysis>
(12.12.2018.)

28. Oil Price, 2019.

URL: <https://oilprice.com/> (10.1.2019.)

29. Omron, 2014a

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=OhaOgiM8aNY> (4.12.2018.)

30. Omron, 2014b

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=dXTssL768Rw> (4.12.2018.)

31. Patterson-UTI, 2017.

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=hXtwEZDqZAE> (12.12.2018.)

32. Petoil, 2012.

URL: <http://petoil.blogspot.com/2012/03/types-of-drilling-rigs-1-land-rigs.html>
(1.12.2018.)

33. Plaviured, 2017.

URL: <https://plaviured.hr/sto-je-tocka-pokrica/> (30.12.2018.)

34. Rgf, 2013.

URL: <http://www.rgf.rs/predmet/RO/V%20semestar/masine%20i%20uredjaji%20za%20eksploataciju%20nafte%20i%20gasa/Predavanja/1%20-%20Opste%20karakteristike%20i%20opis%20rotnog%20postrojenja.pdf> (1.12.2018.)

35. Scmdaleel, 2018.

URL: <https://www.scmdaleel.com/category/onshore-rigs/15> (2.1.2019.)

36. Siemens, 2006.

URL: https://w5.siemens.com/web/ua/ru/iadt/about/references/gaz/broschures/Documents/Oil_drilling.pdf (6.12.2018.)

37. Sjøgeology, 2014

URL: <http://www.sjvgeology.org/history> (1.12.2018.)

38. Sovonex, 2012.

URL: <http://www.sovonex.com/drilling-equipment/api-land-drilling-rigs/electric-mechanical-drilling-rigs/#mechanical-drilling-rigs> (6.12.2018.)

39. World Oil, 2015.

URL: <https://www.worldoil.com/magazine/2015/march-2015/shaletech-report/positive-displacement-motors-improve-drilling-efficiency-reduce-time-to-first-oil> (28.12.2018.)

IZJAVA

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

Marin Lovreković
