

# Primjena optičkih kablova u izvođenju radova na održavanju bušotina upotrebom postrojenja za rad sa savitljivim tubingom

---

Grgić, Lovro

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:983385>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-13**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

**PRIMJENA OPTIČKIH KABLOVA U IZVOĐENJU RADOVA NA ODRŽAVANJU  
BUŠOTINA UPOTREBOM POSTROJENJA ZA RAD SA SAVITLJIVIM TUBINGOM**

Diplomski rad

Lovro Grgić

N311

Zagreb, 2020.

PRIMJENA OPTIČKIH KABLOVA U IZVOĐENJU RADOVA NA ODRŽAVANJU  
BUŠOTINA UPOTREBOM POSTROJENJA ZA RAD SA SAVITLJIVIM TUBINGOM

LOVRO GRGIĆ

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

Sažetak

Prva primjena postrojenja za rad sa savitljivim tubingom u naftnoj i plinskoj industriji zabilježena je 1962. godine u Meksičkom zaljevu. Savitljivi tubing je zapravo čelična cijev kontinuirane duljine, manjeg promjera koja je namotana na bubanj savitljivog tubinga, te se preko njega usmjerava na injektorski sklop uz pomoć pripadajućeg pogonskog sustava prolazeći kroz jedinicu preventerskog sklopa pa sve do kanala bušotine u svrhu obavljanja širokog spektra potrebnih radnji. Stalnim napretkom i razvojem novih tehnoloških rješenja došlo je do razvoja nove ere inovativnih tehnologija koje uključuju primjenu optičkih kablova u stvarnom vremenu te se one koriste u sklopu sastava postrojenja za rad sa savitljivim tubingom. Ovaj diplomski rad opisuje postrojenje za rad sa savitljivim tubingom zajedno sa svojim glavnim komponentama, upotrebu savitljivog tubinga s obzirom na operacije za koje se koriste, te objašnjava nove tehnologije optičkih kablova koje povećavaju ekonomičnost u izvođenju radova na održavanju i opremanju bušotina.

Ključne riječi: savitljivi tubing, injektor, sustav optičkih vlakana u stvarnom vremenu, hibridna tehnologija

Diplomski rad sadrži: 73 stranica, 4 tablice, 42 slika i 49 reference.

Jezik izvornika: hrvatski

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

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

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a

2. Dr. sc. Vladislav Brkić, Izvanredni profesor RGNF-a

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

Datum obrane: 11.12.2020.

APPLICATION OF OPTICAL CABLES IN PERFORMANCE OF WELL MAINTENANCE  
WORKS USING COILED TUBING UNIT

LOVRO GRGIĆ

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

Abstract

The first application of a coiled tubing unit in the oil and gas industry was recorded in 1962 in the Gulf of Mexico. Coiled tubing is a steel pipe of continuous length, smaller diameter, which is wrapped around coiled tubing reel, and through it is directed towards to the injector head with the help of the associated power pack, passing through the unit of the preventer assembly to the well bore to perform a wide range of required operations. The constant progress and development of new solutions has led to the new era of innovative technologies that include the application of real-time optical cables used in the composition of units for working with coiled tubing. This master's thesis describes a coiled tubing unit together with its main components, the use of coiled tubing with regard to the operations for which they are used, and explains new optical cable technologies that increase economic efficiency in performing maintenance and equipping wells.

Keywords: coiled tubing, injector, real-time fiber optic, hybrid technology

Thesis contains: 73 pages, 4 tables, 42 figures and 52 references

Original in: Croatian

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

Supervisor: Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

Reviewers: 1. Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

2. Associate Professor Vladislav Brkić, PhD

3. Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD

Date of defense: December 11, 2020

## SADRŽAJ

<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>I</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>II</b>
<b>POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA:.....</b>	<b>IV</b>
<b>POPIS SKRAĆENICA.....</b>	<b>V</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. SAVITLJIVI TUBING.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. Podrijetlo upotrebe i razvoj savitljivog tubinga .....</b>	<b>2</b>
<b>2.2. Vrste i karakteristike materijala za izradu savitljivog tubinga.....</b>	<b>4</b>
2.2.1. Niskolegirani ugljični čelik .....	4
2.2.2. Titan .....	5
2.2.3. Kompozitni materijali .....	5
<b>2.3. Proces proizvodnje savitljivog tubinga .....</b>	<b>7</b>
<b>3. POSTROJENJE ZA RAD SA SAVITLJIVIM TUBINGOM.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1. Standardni elementi površinske opreme postrojenja za rad sa savitljivim tubingom .....</b>	<b>14</b>
3.1.1. Pogonsko-hidraulički sustav .....	15
3.1.2. Injektorski sklop.....	16
3.1.2.1. Injektor.....	17
3.1.2.2. Vodicica savitljivog tubinga.....	19
3.1.2.3. Indikator težine.....	20
3.1.2.4. Nosač injektora.....	20
3.1.3. Preventerski sklop .....	23
3.1.3.1. Hidrauličko-mehanički preventerski sklop.....	24
3.1.3.2. Striper (preventer automatskog djelovanja).....	26
3.1.4. Bubanj s namotanim savitljivim tubingom i automatskim redačem .....	28
3.1.4.1. Pogonski sustav bubnja savitljivog tubinga .....	28

3.1.4.2. Kapacitet bubnja.....	29
3.1.4.3. Rotirajuća spojnica.....	30
3.1.4.4. Mjerač duljine savitljivog tubinga.....	30
3.1.4.5. Automatski redač .....	31
3.1.5. Kontrolna kabina.....	32
<b>4. PRIMJENA POSTROJENJA ZA RAD SA SAVITLJIVIM TUBINGOM.....</b>	<b>34</b>
<b>4.1. Pročišćavanje i ispiranje kanala bušotine.....</b>	<b>36</b>
4.1.1. Nekompresibilni fluidi za čišćenje i ispiranje .....	37
4.1.2. Kompresibilni fluidi za čišćenje i ispiranje .....	37
<b>4.2. Bušenje uz pomoć savitljivog tubinga .....</b>	<b>38</b>
<b>4.3. Instrumentacija.....</b>	<b>40</b>
<b>4.4. Izvođenje mjerenja uz pomoć savitljivog tubinga .....</b>	<b>42</b>
<b>4.5. Perforiranje .....</b>	<b>44</b>
<b>5. PRIMJENA OPTIČKIH KABLOVA NA POSTROJENJIMA ZA RAD SA SAVITLJIVIM TUBINGOM.....</b>	<b>47</b>
<b>5.1. Mogućnost istovremene primjene savitljivog tubinga i optičkih vlakana pri izvođenju operacija u bušotini.....</b>	<b>47</b>
5.1.1. Sustav optičkih vlakana za prijenos podataka u stvarnom vremenu .....	48
5.1.2. Savitljivi tubing opremljen optičkim kabelom.....	49
<b>5.2. Izoliranje kanala bušotine pješčanim čepom uz pomoć savitljivog tubinga opremljenog integriranog sustavom optičkih vlakana .....</b>	<b>53</b>
5.2.1. Izoliranje proizvodnog intervala uz pomoć savitljivog tubinga opremljenog sustavom optičkih vlakana za prijenos podataka u realnom vremenu .....	54
<b>5.3. Primjena savitljivog tubinga opremljenog optičkim kabelom za ispitivanje proizvodnog potencijala ležišta.....</b>	<b>56</b>
<b>5.4. Preciznost perforiranja sustavom optičkih vlakana u stvarnom vremenu .....</b>	<b>60</b>

<b>5.5. Hibridna tehnologija savitljivog tubinga (kombinacija sustava optičkih vlakana i električnog kabela).....</b>	<b>63</b>
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>67</b>
<b>7. POPIS LITERATURE.....</b>	<b>68</b>

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 3-1.</b> Radne karakteristike stripera sa bočnim otvorom .....	<b>27</b>
<b>Tablica 3-2.</b> Prikaz specifičnih vrijednosti K za različite promjere tubinga .....	<b>29</b>
<b>Tablica 5-1.</b> Specifikacije dubinskog modula u sklopu opreme hibridne tehnologije savitljivog tubinga .....	<b>50</b>
<b>Tablica 5-2.</b> Sastav alata s pripadajućim funkcijama koji služi za mjerenje podataka u realnom vremenu dviju različitih formacija u kanalu bušotine .....	<b>57</b>



## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Projekt PLUTO.....	<b>2</b>
<b>Slika 2-2.</b> Injektorska glava kompanije Bowen Tools .....	<b>3</b>
<b>Slika 2-3.</b> Savitljivi tubing od kompozitnog materijala .....	<b>6</b>
<b>Slika 2-4.</b> Čelične trake u obliku namotaja .....	<b>7</b>
<b>Slika 2-5.</b> Rezanje namotaja čelika na odgovarajuće dimenzije .....	<b>8</b>
<b>Slika 2-6.</b> Var pod kutem od 45 stupnjeva .....	<b>9</b>
<b>Slika 2-7.</b> Užareni savitljivi tubing .....	<b>10</b>
<b>Slika 2-8.</b> Hlađenje savitljivog tubinga uz pomoć tekuće kupke .....	<b>11</b>
<b>Slika 2-9.</b> Savitljivi tubing namotan na bubanj.....	<b>11</b>
<b>Slika 3-1.</b> Postrojenje za rad sa savitljivim tubingom montirano na prikolici koje se uglavnom koristi za kopnene operacije .....	<b>13</b>
<b>Slika 3-2.</b> Odobalno postrojenje za rad sa savitljivim tubingom .....	<b>14</b>
<b>Slika 3-3.</b> Pogonsko-hidraulički sustav savitljivog tubinga.....	<b>15</b>
<b>Slika 3-4.</b> Injektorski sklop savitljivog tubinga .....	<b>16</b>
<b>Slika 3-5.</b> Sustav dvaju suprotno rotirajućih lanaca injektora.....	<b>18</b>
<b>Slika 3-6.</b> Vodicica savitljivog tubinga.....	<b>19</b>
<b>Slika 3-7.</b> Podižuća konstrukcija.....	<b>21</b>
<b>Slika 3-8.</b> Sustav s tornjem.....	<b>22</b>
<b>Slika 3-9.</b> Preventerski sklop s četverostrukim čeljusnim preventerima i striperom s bočnim otvorom.....	<b>23</b>
<b>Slika 3-10.</b> Četverostruki čeljusni preventeri.....	<b>24</b>
<b>Slika 3-11.</b> Konvencionalni striper .....	<b>26</b>
<b>Slika 3-12.</b> Striper sa bočnim vratima.....	<b>27</b>
<b>Slika 3-13.</b> Bubanj savitljivog tubinga sa ostalim pripadajućim komponentama .....	<b>28</b>

<b>Slika 3-14.</b> Rotirajuća spojnica .....	<b>30</b>
<b>Slika 3-15.</b> Automatski redač.....	<b>31</b>
<b>Slika 3-16.</b> Kontrolna kabina postrojenja za rad sa savitljivim tubingom .....	<b>32</b>
<b>Slika 4-1.</b> Broj postrojenja za rad sa savitljivim tubingom u svijetu .....	<b>35</b>
<b>Slika 4-2.</b> Sastav alata za bušenje savitljivim tubingom .....	<b>39</b>
<b>Slika 4-3.</b> Sastav alatki za instrumentaciju pomoću savitljivog tubinga.....	<b>41</b>
<b>Slika 4-4.</b> Jedinica za mjerenje u sklopu savitljivog tubinga .....	<b>43</b>
<b>Slika 4-5.</b> Izrada perforacija primjenom puške perforatora na savitljivom tubingom .....	<b>45</b>
<b>Slika 4-6.</b> Operacije za koje se primjenjuje savitljivi tubing .....	<b>46</b>
<b>Slika 5-1.</b> Savitljivi tubing opremljen hibridnom tehnologijom .....	<b>49</b>
<b>Slika 5-2.</b> Grafički prikaz korištenja modula težine pri prijenosu sile na alatku koja se instrumentira.....	<b>51</b>
<b>Slika 5-3.</b> Sastav alatki hibridne tehnologije savitljivog tubinga u realnom vremenu.....	<b>52</b>
<b>Slika 5-4.</b> Otvorena konstrukcija alata hibridne tehnologije savitljivog tubinga .....	<b>52</b>
<b>Slika 5-5.</b> Snimke perforacija nastalih abrazivnim djelovanjem .....	<b>53</b>
<b>Slika 5-6.</b> Prva faza postavljanja pješčanog čepa.....	<b>55</b>
<b>Slika 5-7.</b> Trodimenzionalni prikaz bušotine Florena A5).....	<b>58</b>
<b>Slika 5-8.</b> Praćenje podataka dvije različite formacije unutar iste bušotine pomoću tehnologije savitljivog tubinga s optičkim vlaknima.....	<b>59</b>
<b>Slika 5-9.</b> Sastavi alata koji su se koristili tijekom zahvata .....	<b>61</b>
<b>Slika 5-10.</b> Podaci u realnom vremenu tijekom perforiranja novog intervala .....	<b>62</b>
<b>Slika 5-11.</b> Korelacija uz pomoć lokatora zaštitnih cijevi i gama zraka .....	<b>65</b>

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA:

OZNAKA	ZNAČENJE	SI
L	kapacitet skladištenja tubinga	m
A	visina namotaja tubinga oko osovine bubnja	cm
C	promjer osovine bubnja	cm
B	širina bubnja	cm
K	vrijednosti specifične za različite promjere tubinga	

## POPIS KORIŠTENIH KRATICA

OZNAKA	OPIS
PLUTO	projekt postavljanja cijevi ispod oceana (engl. <i>Pipe Lines Under The Ocean</i> )
DTS	sustav za mjerenje temperature uzduž optičkog kabla (engl. <i>Disturbed Temperature Sensing</i> )
DAS	sustav koji omogućava primanje akustičnih signala duž optičkog kabla (engl. <i>Disturbed Acustica Sensing</i> )
CCL	lokator zaštitnih cijevi (engl. <i>Logging Casing Collar Locator</i> )
BHP	tlak na dnu kanala bušotine (engl. <i>Bottomhole Pressure</i> )
BHT	temperatura na dnu bušotine (engl. <i>Bottomhole Temperature</i> )

## 1. UVOD

Rezultat razvoja tehnologije i materijala u naftnoj i plinskoj industriji je i stvaranje novih tehnologija koje se koriste prilikom radova u bušotini s ciljem ostvarivanja veće proizvodnje, uz kraće vrijeme potrebno za izvođenje određene operacije, a sve s ciljem povećanja ekonomske koristi. Danas, postrojenje za rad sa savitljivim tubingom (engl. *coiled tubing*) je jedno od najvažnijih postignuća s obzirom na operacije opremanja i održavanja bušotine. Savitljivi tubing je zapravo čelična cijev kontinuirane duljine, manjeg promjera koja je namotana na bubanj savitljivog tubinga, te se preko njega usmjerava na injektorski sklop uz pomoć pripadajućeg pogonskog sustava prolazeći kroz jedinicu preventerskog sklopa pa sve do kanala bušotine u svrhu obavljanja potrebnih radnji u bušotini. Broj postrojenja za rad sa savitljivim tubingom u svijetu raste zbog širokog spektra primjene, a neke od najvažnijih operacija za koje se koristi savitljiv tubing su: pročišćavanje i ispiranje kanala bušotine, instrumentacija, izvođenje mjerenja u kanalu bušotine, bušenje i perforiranje uz pomoć savitljivog tubinga i dr. Tehnologija savitljivog tubinga u naftnoj industriji je u početku razvijena za radne operacije u aktivnim, proizvodnim bušotinama. Savitljivi tubing ispunjava tri ključna zahtjeva prilikom izvođenja operacija u aktivnim bušotinama pružajući adekvatnu zaštitu u odnosu na djelovanje tlaka u bušotini, kontinuirani prijenos fluida u/iz bušotine i mogućnost spuštanja odnosno podizanja niza savitljivog tubinga u/iz bušotine koja je pod tlakom. Primjena savitljivog tubinga izvrsno je rješenje u horizontalnim i koso usmjerenim bušotinama zbog njegove sposobnosti prenošenja alata i opreme do određenog mjesta unutar kanala bušotine. U svrhu smanjenja troška izvođenja različitih operacija u bušotini, operatori koriste nove metode hibridne tehnologije koja kombinira savitljivi tubing i sustava optičkih vlakana prilikom izvođenja radova na održavanju bušotine. U ovom radu biti će opisano postrojenje za rad sa savitljivim tubingom zajedno sa njegovim glavnim komponentama, upotreba savitljivog tubinga s obzirom na operacije za koje se koristi, te će biti prikazane nove tehnologije koje uključuju primjenu optičkih kablova u izvođenju radova na održavanju bušotine te rezultati njihove primjene na terenu.

## 2. SAVITLJIVI TUBING

Od samih početaka primjene postrojenja za rad sa savitljivim tubingom pa sve do danas došlo je do velikog unaprjeđenja materijala od kojeg se izrađuje savitljivi tubing, a naročito je napredovala tehnologija izrade savitljivog tubinga.

### 2.1. Podrijetlo upotrebe i razvoj savitljivog tubinga

Podrijetlo upotrebe tehnologije savitljivog tubinga započinje sredinom 20. stoljeća, točnije 1944. godine kada su inženjeri iz Engleske postavili kontinuirani niz savitljivih, čeličnih cijevi na dno morskog kanala La Manche-a s ciljem osposkrbe Europskog kontinenta naftnim derivatima. Projekt kodnog naziva PLUTO (engl. *Pipe Lines Under The Ocean*) bio je strogo tajni saveznički pothvat, koji je uključivao postavljanje cjevovoda od obale Engleske do nekoliko točaka duž obale Francuske. Cijevi unutarnjeg promjera 7,2 cm (3") kontinuirane duljine bile su namotane na masivne šuplje bubnjeve čiji zadatak je bio savijanje i namatanje cijele duljine pojedinih segmenata cjevovoda. Konstrukcija bubnja širine 18,28 m (60 ft), promjera jezgre 12,19 m (40 ft) dizajnirana je da bude dovoljne veličine i nosivosti s obzirom na veliku duljinu i promjer cjevovoda. Čelični cjevovodi unutarnjeg promjera 7,62 cm (3"), proizvedeni su čeličnim zavarivanjem pojedinačnih cijevi duljine 12,19 m (40 ft) u segmente cjevovoda od 1219 m (4 000 ft). Zavareni segmenti cjevovoda duljine 1219 m (4000 ft) na morskom dnu tvorili su mrežu od ukupno 23 cjevovoda. Slika 2-1. prikazuje niz cjevovoda i masivni bubanj projekta PLUTO (Petrowiki, 2015a).



**Slika 2-1.** Projekt PLUTO (D-day revisited, 2012)

Iako se navodi da se primjena savitljivog tubinga dogodila u ranima četrdesetim godinama prošlog stoljeća, prvi koncept postrojenja za rad sa savitljivim tubingom u naftnoj i plinskoj industriji javlja se 1962. godine u Meksičkom zaljevu. Kompanije Bowen Tools i California Oil Company proizvele su prvo postrojenje za rad sa savitljivim tubingom čiji primarni zadatak je bio ispiranje nataloženog pijeska u kanalu bušotine. Prvo postrojenje dizajnirano je kao vertikalni, okretni, cilindrični sustav izgrađen da pokreće niz cijevi vanjskog promjera 3,34 cm (1,315") i s mogućnošću manipulacije tereta mase do 15 tona (30 000 lbf). Promjer jezgre bubnja cijevi iznosio je 2,74 m (9 ft), a bio je opremljen okretnim elementom postavljenim na osovini kotača kako bi se omogućilo kontinuirano kretanje niza savitljivog tubinga tijekom rada postrojenja. Prva injektorska glava prikazana na slici 2-2. sastojala se od dvaju suprotno rotirajućih lanaca, a takav princip se koristi i na današnjim postrojenjima. Uloga stripera je bila da brtvi prstenasti prostor oko tubinga s time da bi se aktivirao kada bi bio izložen malom tlaku na ušću bušotine (Petrowiki, 2015a).



**Slika 2-2.** Injektorska glava kompanije Bowen Tools (Coil solutions, 2016)

Prvotna uspješna izrada niza cjevovoda savitljivog tubinga u okviru projekta PLUTO, a zatim prvim prototipom postrojenja za rad sa savitljivim tubingom primijenjenim na plinskim i naftnim bušotinama u Meksičkom zaljevu postavljen je temelj za daljnji razvoj tehnologije savitljivog tubinga i nadogradnju postrojenja za rad sa savitljivim tubingom. Postrojenje za rad sa savitljivim tubingom postalo je ključan sastavni dio mnogih operacija koje se izvode u bušotini. Tehnologija savitljivog tubinga danas čini 75% svih remontnih radova u svijetu (Ctes, 2005).

## **2.2. Vrste i karakteristike materijala za izradu savitljivog tubinga**

Materijal za izradu savitljivog tubinga da bi zadovoljio sve uvjete s obzirom na niz operacija za koje se koristi treba ispuniti sljedeće kriterije:

- imati dovoljnu mehaničku čvrstoću da bi mogao izdržati kombinaciju sila nametnutih u radu;
- biti izrazito male težine zbog smanjenja logističkih problema i ukupnih troškova;
- omogućiti maksimalni mogući radni vijek.

### **2.2.1. Niskolegirani ugljični čelik**

Savitljivi tubing koji se danas koristi uglavnom se proizvodi iz debelih traka niskolegiranog ugljičnog čelika. Namotaji debele trake od niskolegiranog čelika mogu biti široki do 140 cm (55") te imati masu preko 24 tone. Duljina svake trake ovisi o njezinoj debljini, te ona varira između 1000 metara (3500 ft) za najtanje trake debljine 0,22 cm (0,087") pa sve do duljina od približno 300 m (1000 ft) za trake debljine od 0,64 cm (0,250"). Najčešće vrste niskolegiranog čelika koje se koriste za proizvodnju savitljivog tubinga su termo-mehanički modificirani tip čelika "ASTM A606" i modificirani niskolegirani čelik "ASTM A607". Tvornice koje se bave proizvodnjom čelika mogu prilagoditi čvrstoću u rasponu od 3800 bar (55 Kpsi) pa sve do 6205 bar (90 Kpsi) uz pravilnu toplinsku obradu. Najčešći vanjski promjeri savitljivog tubinga od niskolegiranog čelika na tržištu su od 2,54 cm (1") do 11,43 cm (4,5"), ali postoje i veći promjeri do 16,83 cm (6,625") proizvedeni u kratkim duljinama koji se koriste za testiranje savitljivog tubinga (Ctes, 2005).



### 2.2.2. Titan

Proizvodne tvornice savitljivog tubinga proizvele su male količine savitljivog tubinga od titana koji se koristi u izrazito korozivnim sredinama. Titan je pouzdan materijal za primjenu u korozivnim uvjetima, ali visoki troškovi ozbiljno su ograničili njegovu širu primjenu. Cijena titana je i do 10 puta veća od ugljičnog čelika. Dodatni nedostatak titana je taj što je njegovo zavarivanje izuzetno zahtjevno jer temperatura taljenja titana iznosi 1668 °C (Ctes, 2005).

### 2.2.3. Kompozitni materijali

Druga alternativa čeliku za proizvodnju savitljivog tubinga je kompozitni materijal izrađen od vlakana koja se ugrađuju u matricu smole. Vlakna koja su obično staklena ili karbonska se namataju oko termoplastičnih cijevi, te se dodatno zasićuju epoksidnom smolom. Toplina ili UV zračenje stvrdnjavaju smolu dok se cijev kreće duž montažne linije. Na slici 2-3. su prikazani primjeri tri različite vrste savitljivog tubinga izrađenog od kompozitnog materijala tvrtke Fiberspar. Tvrtka Fiberspar je jedina tvrtka koja od 2000. godine proizvodi savitljivi tubing od kompozitnog materijala. Unutrašnjost tubinga je obložena žutom ili zatamnjenom površinom koja čini termoplastični oblog. Za određenu debljinu stijenke i promjer, tvrtka Fiberspar pruža širok spektar karakteristika i mogućnosti kontrolirajući mješavinu vlakana, orijentaciju njihovih namotaja i svojstva matrice smole. Kompanija Halliburton je započela prvu komercijalnu upotrebu savitljivog tubinga od kompozitnog materijala u Nizozemskoj sredinom 1998. godine. Do sredine 2000. godine Fiberspar je proizveo više od 160 km (100 milja) savitljivog tubinga od kompozitnog materijala (Ctes, 2005).



**Slika 2-3.** Savitljivi tubing od kompozitnog materijala (Ctes, 2005)

Prednosti kompozitnog u odnosu na niskolegirani ugljično čelični savitljivi tubing su sljedeće:

- ima 10 puta veću otpornost na oštećenja nastala zamorom materijala od čelika;
- masa kompozitnog u odnosu na niskolegirani čelični savitljivi tubing je manja za jednaki promjer;
- ima bolje performanse u korozivnim sredinama;
- u sastavu stijenke tubinga mogu biti ugrađeni vodiči električne struje ili optička vlakna.

Nedostatci kompozitnog savitljivog tubinga u odnosu na čelični su sljedeće (Ctes, 2005):

- izrazito visoka cijena (3 do 5 puta veća u odnosu na čelični savitljivi tubing);
- smanjena dostupnost na tržištu;
- osjetljivi na visoke temperature (iznad 120 °C dolazi do topljenja smole);
- izrazito manja krutost.

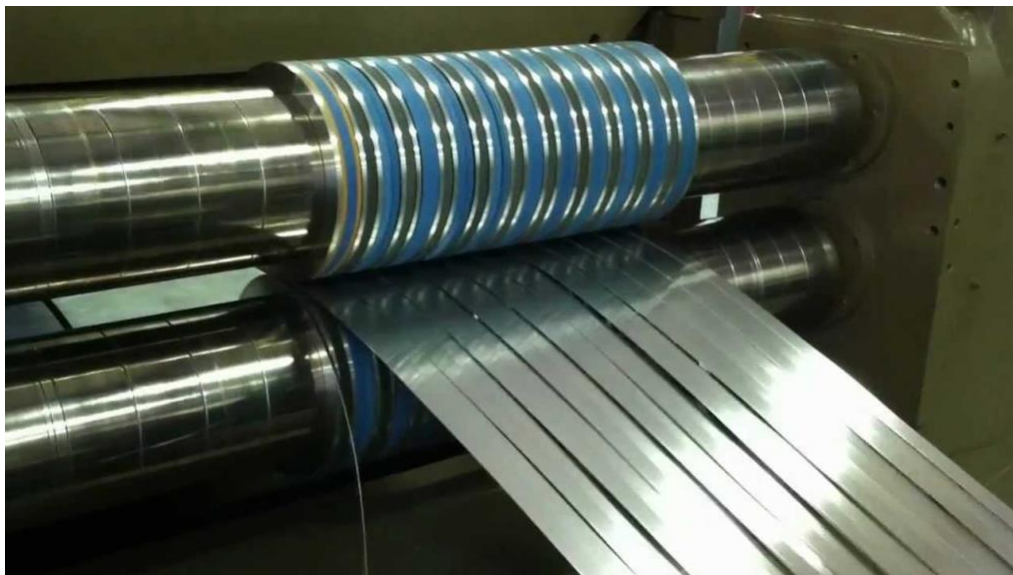
### 2.3. Proces proizvodnje savitljivog tubinga

Proces proizvodnje savitljivog tubinga započinje nabavom zaliha čelika. Osnovna komponenta čelika je željezo. Sirovo željezo se najprije tali kako bi mu se uklonile sve nečistoće, te mu se dodaju primjese kako bi se povećala kvaliteta sirovog materijala, a pritom i udovoljili zahtjevi za proizvodnju savitljivog tubinga. Talina se nakon toga izljeva, te se oblikuju čelične trake. Čelične trake se uz pomoć rotirajućih valjaka namotavaju oko kalema u obliku namotaja uz kontrolirani proces zagrijavanja i hlađenja. Čelične trake u obliku namotaja se koriste za daljni process proizvodnje savitljivog tubinga, prikazano na slici 2-4. Uobičajna širina namotaja čeličnih traka je između 101,6 cm (40") i 122 cm (48") (Petrowiki, 2015b).



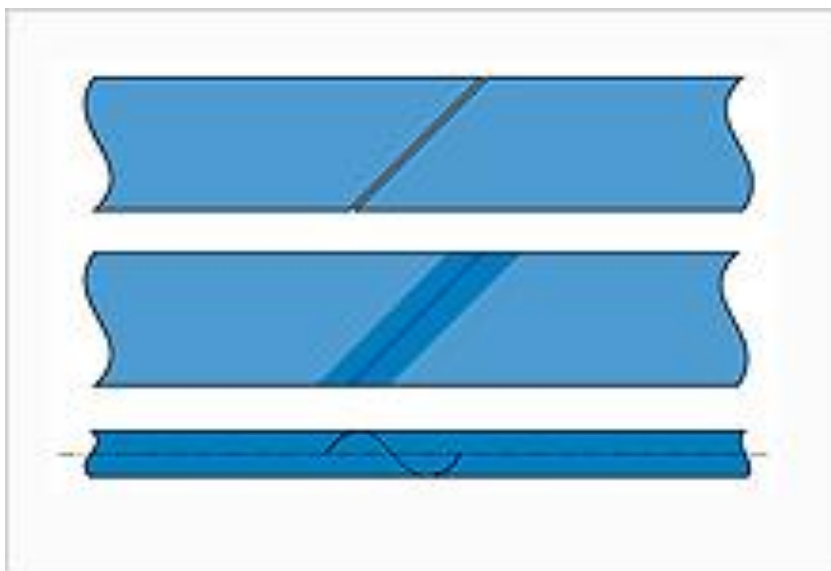
**Slika 2-4.** Čelične trake u obliku namotaja (Indiamart, 2012a)

Kako ne bi došlo do površinske oksidacije, namotaji čelika dodatno se tretiraju postupkom čišćenja čelika uz pomoć kiseline, te se također premazuju posebnim premazima za zaštitu prilikom transporta. Nakon odabira promjera savitljivog tubinga, čelični namotaji režu se uz pomoć valjkastih rezača na odgovarajuće dimenzije (slika 2-5).



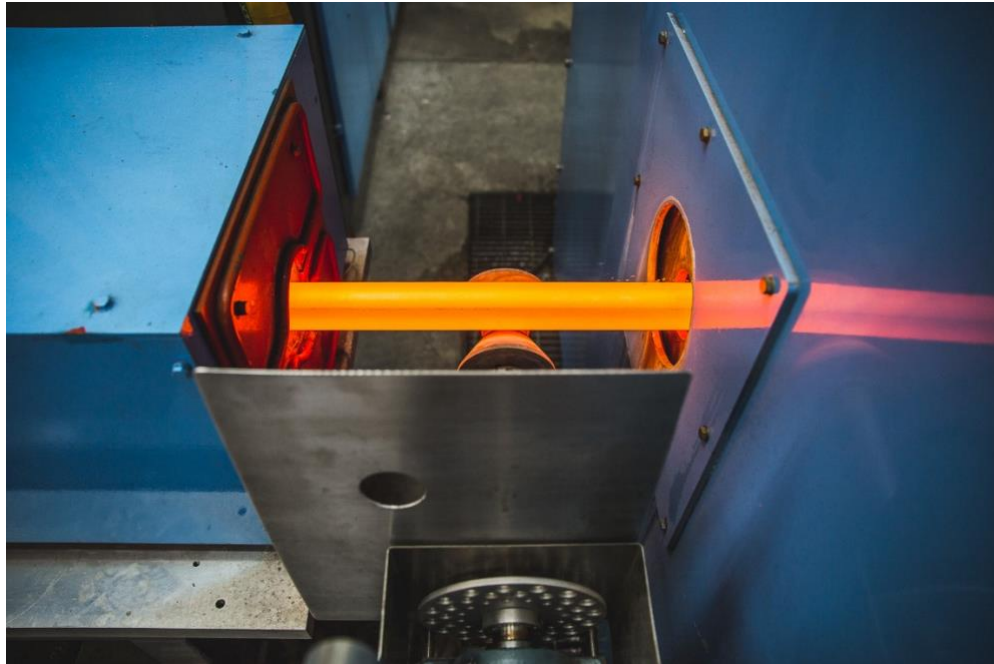
**Slika 2-5.** Rezanje namotaja čelika na odgovarajuće dimenzije (Steelguru, 2015)

Čelične trake se provjeravaju s obzirom na kvalitetu bočnog reza, te se namotavaju na posebni bubanj. Do 1987. godine za spajanje čeličnih traka koristili su se čeoni varovi. Čeoni var zbog svojih loših mehaničkih karakteristika, osobito pod utjecajem topline je bio mjesto gdje je dolazilo do pojave deformacija, odnosno pucanja savitljivog tubinga. Čelične trake su se usmjeravale jedna prema drugoj, te uz pomoć aparata za varenje došlo je do njihovog spajanja. Zbog zadebljanja na mjestu čeonog vara došlo bi do stvaranja oscilacija između promjera vara i čeličnih traka. Nakon 1987. godine čeoni var je zamjenjen varom pod kutem od 45 stupnjeva (engl. *bias weld*), što je rezultiralo dramatičnim povećanjem radnog vijeka savitljivog tubinga. Mehanička svojstva zavarenih čeličnih traka su ista, a profil vara ravnomjerno raspoređuje naprezanja preko veće duljine savitljivog tubinga. Zavareno područje pregledava se uz pomoć rendgenskih zraka kako bi se osiguralo da zavar nije oštećen. Na slici 2-6. je prikazan var pod kutem od 45 stupnjeva.



**Slika 2-6.** Var pod kutem od 45 stupnjeva (Schlumberger, 2020a)

Kada se čelične trake formiraju u cijev, var poprima spiralni oblik koji je mnogo učinkovitiji od čeonog vara. Posljednji korak u proizvodnji savitljivog tubinga je oblikovanje čeličnih traka u cijev. Kontinuirane čelične trake se uz pomoć različitih vrsta valjaka transformiraju u cijev. Prvi par horizontalnih valjaka je zadužen za prešanje čeličnih traka na odgovarajuću debljinu stijenke. Zatim slijede valjci koji savijaju rubove traka prema gore, te oblikuju karakterističan U-oblik koji je potreban prije samog zavarivanja rubova cijevi. Zadnji okomiti valjci usmjeravaju rubove traka prema gore sve dok se ne formira oblik cijevi (Webco industries, 2018). Nakon što su čelične trake preoblikovane u cijev, rubovi čelične trake se spajaju električnim postupkom zavarivanja opisanim kao visokofrekventno indukcijsko zavarivanje. Indukcijski zavarivač prenosi toplinu duž formirane zavojnice koja se stvara uz pomoć otpora pri protoku električne struje. Zagrijana zavojnica spaja rubove čelične trake, te se ona nastavlja kretati kroz niz valjaka koji spajaju užarene rubove. Slika 2-7. prikazuje užareni savitljivi tubing koji je bio podvrgnut procesu indukcijskog zavarivanja pri proizvodnji (Petrowiki, 2015b).



**Slika 2-7.** Užareni savitljivi tubing (Forum energy technologies, 2017)

Karbidni rezač na vanjskoj strani cijevi uklanja deformacije koje su nastale na mjestu vara, a uz pomoć posebnih alata uklanjaju se unutarnje deformacije koje su nastale tijekom varenja. Nakon uklanjanja vanjskih i unutarnjih deformacija nakon varenja, var se dodatno toplinski obrađuje. Savitljivi tubing nakon termičke obrade ulazi u jedinicu za dimenzioniranje vanjskog promjera, a dopušteno odstupanje iznosi  $\pm 0,254$  mm (0,01 in). Tubing zatim ulazi u drugu sekciju za termo obradu gdje se zagrijava cjelokupna površina tubinga na predodređenu temperaturu kako bi se smanjila napreznja unutar stijenki. Cijev se nakon zavarivanja i oblikovanja pušta da se hladi na zraku, a zatim unutar tekuće kupke prije nego što prođe kroz kontrolnu stanicu gdje se pregledava tijelo cijevi. Provjera se obično vrši s vrtložnim uređajem koji stvara magnetsko polje oko tijela cijevi i traži izobličenja u polju nastala zbog površinskih oštećenja na tijelu cijevi. Hlađenje savitljivog tubinga nakon oblikovanja uz pomoć tekuće kupke je prikazano na slici 2-8 (Manufacturing best practices, 2018).



**Slika 2-8.** Hlađenje savitljivog tubinga uz pomoć tekuće kupke (Manufacturing best practices, 2018)

Procesom hlađenja, temperatura savitljivog tubinga se smanjuje na temperaturu okoline. Posljednja stavka u procesu proizvodnje savitljivog tubinga je namatanje na bubanj. Namotani savitljivi tubing se dodatno testira hidrodinamičkim testom, te nakon uspješnog hidrodinamičkog testa na krajeve namotanog savitljivog tubinga se postavljaju čepovi. Na slici 2-9. je prikazan novi savitljivi tubing namotan na bubanj.



**Slika 2-9.** Savitljivi tubing namotan na bubanj (World Oil, 2016)

Svi proizvedeni nizovi savitljivog tubinga dobivaju jedinstveni identifikacijski broj koji je dodijeljen u trenutku izrade. Dokumentacija za svaki proizvedeni niz savitljivog tubinga treba sadržavati sljedeće podatke (Petrowiki, 2015b):

- identifikacijski broj,
- vanjski promjer cijevi,
- klasu materijala,
- debljinu stijenke,
- položaj zavarivanja,
- ukupnu duljinu



### 3. POSTROJENJE ZA RAD SA SAVITLJIVIM TUBINGOM

Na tržištu naftne i plinske industrije dostupno je nekoliko različitih vrsta dizajna postrojenja za rad sa savitljivim tubingom. Međutim, osnovne komponente postrojenja za rad sa savitljivim tubingom su vrlo slične. Glavne razlike su u radnim karakteristikama i hidrauličkom sustavu napajanja. S obzirom na radne uvjete okoline, postrojenje za rad sa savitljivim tubingom može se koristiti kao kopneno postrojenje za rad sa savitljivim tubingom i odobalno postrojenje za rad sa savitljivim tubingom, kao što je to prikazano na slikama 3-1 i 3-2. Izvedbe kopnenog postrojenja za rad sa savitljivim tubingom su: postrojenje za rad sastavljeno od zasebnih jedinica, teretno vozilo na kojem je namontirano postrojenje za rad sa savitljivim tubingom i postrojenje za rad sa savitljivim tubingom montirano na prikolici (Drilling formulas.com, 2016).



**Slika 3-1.** Postrojenje za rad sa savitljivim tubingom montirano na prikolici koje se uglavnom koristi za kopnene operacije (Drilling formulas.com, 2016)



**Slika 3-2.** Odobalno postrojenje za rad sa savitljivim tubingom (Cardinal Services, 2020)

### **3.1. Standardni elementi površinske opreme postrojenja za rad sa savitljivim tubingom**

Glavni elementi površinske opreme za rad sa savitljivim tubingom su (Drilling formulas.com, 2016):

- pogonsko-hidraulički sustav (engl. *power pack*),
- injektorski sklop (engl. *injector head*),
- preventeski sklop (engl. *pressure control system*);
- bubanj s namotanim savitljivim tubingom i automatskim redačem (engl. *coiled tubing reel*);
- kontrolna kabina (engl. *control cabin*).

### 3.1.1. Pogonsko-hidraulički sustav

Jedinica pogonsko-hidrauličkog sustava savitljivog tubinga može biti izrađena u više različitih konfiguracija, ovisno o radnom okruženju za koje je namijenjena. Većinom, to su sustavi hidrauličkih pumpi koje pokreću dizelski ili električni motori. Općenito, osnovni pogonski sustav koji se koristi na postrojenju za savitljivi tubing je opremljen dizelskim motorima i višestupanjskim hidrauličkim pumpama koje obično ostvaruju radni tlak od 206 bar (3 000 psig) do 345 bar (5 000 psig), slika 3-3. Pogonski dizelski motori zaduženi su za pogon visokotlačnih hidrauličkih pumpi koje dopremaju ulje za rad hidrauličkih motora na injektoru i bubnju savitljivog tubinga, te također za rad preventerskog sklopa što uključuje i rad stripera.



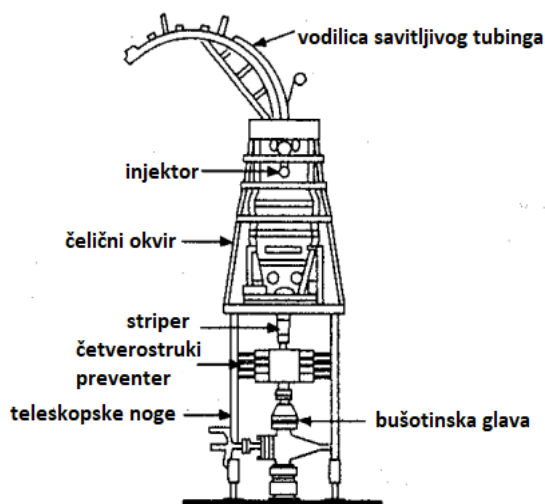
**Slika 3-3.** Pogonsko-hidraulički sustav savitljivog tubinga (Consolidate rig works, 2020)

U današnjoj izvedbi pogonsko-hidrauličkog sustava, obično se koriste akumulatorske jedinice da bi se osigurao volumen i tlak fluida za kontroliran rad injektora. Broj akumulatorskih jedinica u pravilu se kreće od jedan do šest, ovisno o veličini postrojenja i potrebnom tlaku za normalan rad. Sustav akumulatorskih jedinica mora imati dovoljan volumen i kapacitet tlaka za tri puna radna ciklusa svih klipova u svim dijelovima preventerskog sklopa bez ponovnog punjenja iz

napajanja. Ti se radni ciklusi tipično opisuju kao otvoreni ciklus i zatvoreni ciklus i treba ih provoditi periodično kako bi se osiguralo da akumulatorske jedinice budu prethodno napunjene za odgovarajuću kontrolu tlaka u bušotini i da u krugu nema hidrauličkih propuštanja. Također, hidrauličke pumpe pogonskog sustava opremljene su ventilima za smanjenje tlaka (rasteretni ventili) koji ograničavaju količinu hidrauličkog tlaka koju pumpa može isporučiti u propisanom krugu. Ti ventili za rasterećenje su podešeni na željeni tlak za dotični krug i moraju se povremeno provjeravati kako bi se osiguralo da rade pravilno. Posebni rasteretni ventil koji pokreće motore injektora se podesi na maksimalni proračunati tlak koji ne prelazi granicu sigurnosnog opterećenja savitljivog tubinga tijekom rada, odnosno tijekom izvlačenja i spuštanja savitljivog tubinga (Petrowiki, 2015c).

### 3.1.2. Injektorski sklop

Injektorski sklop savitljivog tubinga je komponenta postrojenja koja se koristi za zahvat cijevi kontinuirane duljine i osiguravanje sila potrebnih za pokretanje i povlačenje cijevi u/iz bušotine (slika 3-4).



**Slika 3-4.** Injektorski sklop savitljivog tubinga (Oilfield team, 2019)

Sastavni dijelovi injektorskog sklopa su sljedeći:

- injektor,
- vodilica savitljivog tubinga,
- indikator težine,
- nosač injektora.

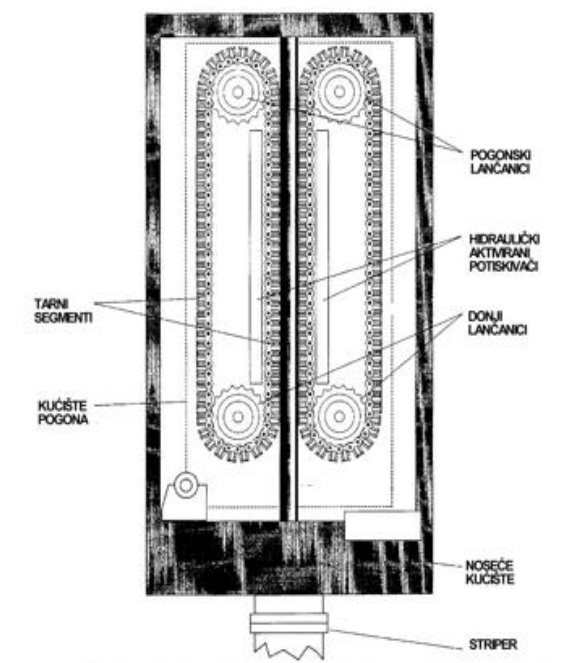
### *3.1.2.1. Injektor*

Injektor osigurava sljedeće funkcije koje su potrebne za normalan rad postrojenja sa savitljivim tubingom:

- osigurava dinamičku aksijalnu silu na savitljivi tubing kako bi se kontroliralo kretanje u ili iz bušotine;
- osigurava dovoljnu vučnu silu da ne bi došlo do proklizavanja savitljivog tubinga;
- primjenjuje dovoljnu statičku silu da bi se savitljivi tubing zadržao u stacionarnom stanju kad se zaustavi;
- sadrži senzore za mjerenje težine i duljine alata u bušotini.

Injektorska glava jedan je od kritičnih dijelova postrojenja savitljivog tubinga i sastoji se od nekoliko hidrauličkih sustava koji omogućuju savitljivom tubingom da djeluje s visokim stupnjem operativne varijabilnosti. Njegova funkcija je osiguranje dovoljnog kapaciteta povlačenja i potiskivanja potrebnih za pokretanje i povlačenje savitljivog tubinga u/iz bušotine. Pri radu u bušotini, važno je osigurati da blokovi hvatača lanca i injektor imaju odgovarajuću snagu prijanjanja i djelovanja kako bi nadvladali djelovanje tlaka u bušotini (Ctes, 2005).

Dva kontinuirana i nasuprotna lanca primarno su obilježje injektorske glave (slika 3-5.). Uz pomoć sile trenja između tarnih segmenata i tubinga omogućeno je kretanje tubinga. Hidraulički motori kontroliraju brzinu i smjer djelovanja injektora na tubing. Motori svojim radom pokreću rotaciju zupčanika, dok zupčanici prenose svoju rotaciju na lance i tarne segmente.



**Slika 3-5.** Sustav dvaju suprotno rotirajućih lanaca injektora (Matanović i Moslavac, 2011)

Kratki tarni segmenti oblikovani su da odgovaraju jednoj veličini vanjskog promjera savitljivog tubinga ili su oblika "V" koji omogućava prihvaćanje različitog promjera savitljivog tubinga. Prednost tarnih segmenata koji obuhvaćaju poluobod određenog promjera je u tome što se cjelokupna sila trenja ravnomjerno raspoređuje po čitavoj površini savitljivog tubinga, ali nemaju veliku fleksibilnost jer su proizvedeni za određeni vanjski promjer savitljivog tubinga. Tarni segmenti oblika "V" imaju veću fleksibilnost jer mogu prihvatiti različiti raspon vanjskog promjera savitljivog tubinga, ali im je nedostatak što djeluju pod većim tlakom na 4 kontaktne točke nasjedanja između savitljivog tubinga i tarnog segmenta zbog male dodirne površine. Djelovanjem sile trenja pridržava se sav teret pa stoga materijal od kojega su izrađeni tarni segmenti utječe na učinkovitost injektora i prevenciju mehaničkih oštećenja tubinga (Matanović i Moslavac, 2011).

### 3.1.2.2. Vodilica savitljivog tubinga

Svaki injektorski sklop ima zakrivljenu strukturu na sebi koja osigurava kretanje savitljivog tubinga unutar i iz injektora. Vodilica savitljivog tubinga (ili guskin vrat) ima nekoliko valjaka duž svoje duljine koji podupiru savitljivi tubing. Slika 3-6 prikazuje vodilicu savitljivog tubinga koja se nalazi iznad injektora. Vodilica savitljivog tubinga ima dvije glavne svrhe:

- osiguravanje kontroliranog polumjera savijanja kako bi savitljivi tubing mogao ući/napustiti sustav suprotno rotirajućih lanaca;
- prilagodba kuta namatanja ili odmatanja između injektora i bubnja.



**Slika 3-6.** Vodilica savitljivog tubinga (Harestad, 2019)

Vodilica savitljivog tubinga koja se nalazi iznad injektora vodi savitljivi tubing s bubnja u suprotno rotirajuće lance injektora. Vodilica savitljivog tubinga također treba sadržavati niz sekundarnih valjaka postavljenih iznad savitljivog tubinga da bi centralizirali cijev dok prolazi kroz zakrivljenu vodilicu. Broj, veličina, materijal za izradu kao i razmak valjaka mogu se značajno razlikovati ovisno o različitim izvedbama lukova vodilice. Za savitljivi tubing koji se više puta koristi u slučajevima zahvata unutar bušotine ili operacije bušenja, polumjer vodilice treba biti najmanje 30 puta veći od navedenog vanjskog promjera savitljivog tubinga koji se koristi. Ovaj

faktor može biti manji za savitljivi tubing koji će se savijati samo nekoliko puta, kao što je to slučaj tijekom ugradnje savitljivog tubinga kao proizvodnog niza. Savitljivi tubing neprekidne duljine treba ulaziti i izlaziti iz vodilice prema krivulji koju tvori sama vodilica savitljivog tubinga. Svaki nagli kut savijanja kroz koji prolazi savitljivi tubing uzrokuje povećana naprezanja na savijanje, što dramatično povećava oštećenje uslijed zamora materijala cijevi. (Petrowiki, 2015d)

### *3.1.2.3. Indikator težine*

Važno je da injektor bude opremljen indikatorom težine koji mjeri vlačno/tlačno opterećenje u savitljivom tubingu (iznad stripa), pri čemu se rezultati mjerenja težine prikazuju operateru koji rukovodi izvođenjem pojedine operacije sa savitljivim tubingom unutar bušotine. Također bi trebao postojati indikator težine koji mjeri tlačnu silu unutar savitljivog tubinga ispod injektora kada se savitljivi tubing spušta u bušotinu. Indikator težine također pomaže operateru u otkrivanju nailaska na zapreke u kanalu bušotine što rezultira velikim povećanjem ili smanjenjem težine savitljivog tubinga u kanalu bušotine registriranim na površini. Postoji nekoliko izvedbi indikatora težine, a to su najčešće hidraulički, elektronički ili kombinacija spomenuta dva. Ako se koristi indikator težine koji mjeri količinu „negativne težine“ koja je zapravo jednaka težini sklopa lančanog pogona u okviru injektora, potisna sila primijenjena tijekom operacije sa savitljivim tubingom ne smije prelaziti težinu lančanog sklopa unutar injektora.

### *3.1.2.4. Nosac injektora*

Da bi se smanjio utjecaj štetnih opterećenja na injektorskom sklopu, površinskoj opremi i bušotinskoj glavi tijekom operacija unutar bušotine, potrebno je učvrstiti i stabilizirati injektor. Injektor se može stabilizirati iznad bušotinske glave uz pomoć:

- teleskopskih nogu;
- podižuće konstrukcije;
- dizalice ili tornja.



Teleskopske noge uglavnom se koriste u postrojenjima za savitljivi tubing gdje nije moguće korištenje podižuće konstrukcije. Kada se koriste teleskopske noge, gornji dijelovi nogu se ubacuju u četiri cilindra koji se nalaze na krajevima okvira injektora, a zatim se injektor učvršćuje sigurnosnim zaticima na odgovarajućoj visini. Podloge za noge postavljene su ispod svake teleskopske noge kako bi se masa injektora raspodijelila jednoliko po površini tla. Podižuća konstrukcija se koristi u uvjetima postavljanja gdje je dostupna neometana površina (npr. odobalne platforme) te se preporučuje podupiranje injektora pomoću hidrauličke ili mehanički kontrolirane podižuće konstrukcije (slika 3-7).



**Slika 3-7.** Podižuća konstrukcija (Dwellop, 2018a)

Jednom kada se postigne željena visina postolja, četiri noge na obodu postolja su učvršćene na svom mjestu. Podnožje uzdignutog okvira ravnomjerno raspoređuje težinu injektora po obodu okvira. Prednost upotrebe podižuće konstrukcije naspram teleskopskih nogu je u većoj stabilnosti. Zbog povećane stabilnosti i kraćeg vremena potrebnog za montažu, postrojenja s tornjem za pridržavanje injektorskog sklopa sve se češće koriste u odnosu na pridržavanje dizalicom. Dizalica se uglavnom koristi za pridržavanje injektorskog sklopa tijekom radova

zbog svoje praktičnosti. Glavna prednost ovih vrsta stabilizacije je omogućavanje upotrebe izrazito dugih lubrikatora i visokog sklopa opreme potrebnih za kontrolu ušća bušotine. Sustav postrojenja s tornjem prikazan je na slici 3-8 (Dwellop, 2018b)



**Slika 3-8.** Sustav s tornjem (Drilling contractor, 2009)

### 3.1.3. Preventerski sklop

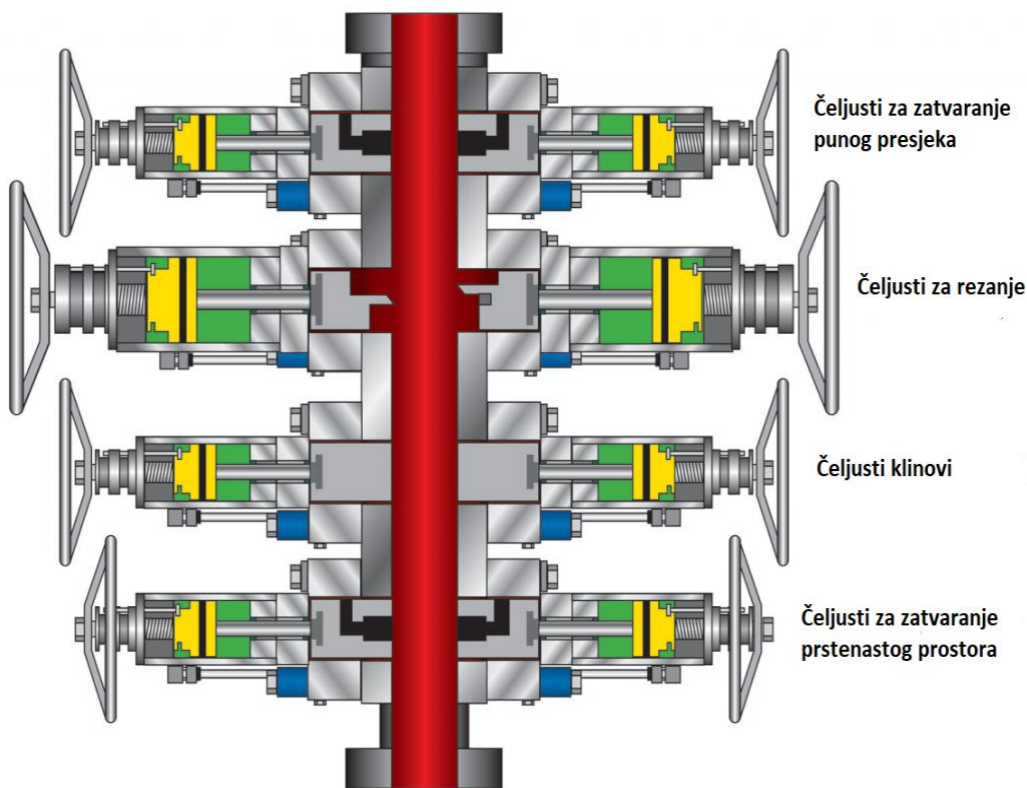
Tipična oprema za kontrolu tlaka u bušotini za operacije sa savitljivim tubingom sastoji se od nekoliko hidrauličko-mehničkih preventera iznad kojih se nalazi preventer automatskog djelovanja, odnosno striper. Postrojenja za rad sa savitljivim tubingom koja rade pod velikim tlakom imaju dva stripera i dodatne komponente preventerskog sklopa. Sve komponente preventerskog sklopa moraju biti ispitane na maksimalne vrijednosti tlaka i temperature u bušotini. Također, svaka komponenta mora biti kompatibilna s bilo kojom korozivnom tekućinom koja se može očekivati u bušotini ili korozivnom tekućinom koja se koristi kao dio operacije sa savitljivim tubingom. Svaki dio preventerskog sklopa moguće je aktivirati hidraulički, ručnom sisaljkom ili mehaničkim načinom. Preventeski sklop sa četverostrukim čeljusnim preventerima i striperom s bočnim otvorom prikazan je na slici 3-9.



**Slika 3-9.** Preventerski sklop s četverostrukim čeljusnim preventerima i striperom s bočnim otvorom (Ctes, 2005)

### 3.1.3.1. Hidrauličko-mehanički preventerski sklop

Glavna zadaća hidrauličko-mehaničkog preventerskog sklopa je kontrola tlaka u bušotini i sprječavanje erupcije fluida iz bušotine. Preventerski sklop za postrojenje sa savitljivim tubingom je dizajniran posebno za operacije sa savitljivim tubingom. Hidrauličko-mehanički preventerski sklop postrojenja sa savitljivim tubingom sastoji se od nekoliko parova čeljusti. Svaka vrsta čeljusti obavlja određenu funkciju. Broj i vrsta čeljusnih parova u preventerskom sklopu određeni su konfiguracijom preventerskog sklopa. Standardni čeljusni preventeri koji se koriste kod radova sa savitljivim tubingom su četverostruki čeljusni preventeri (slika 3-10) (Ctes, 2005).



**Slika 3-10.** Četverostruki čeljusni preventeri (Petrowiki, 2015e)

Za uobičajne radove u bušotini sa savitljivim tubingom, standardni četverostruki čeljusni preventerski sklop (odozgo prema dolje) sastoji se od sljedećih čeljusti i njihovih funkcija (Ctes, 2005)::

- a) čeljusti za zatvaranje punog presjeka - služe za zatvaranje kanala bušotine kada se u kanalu bušotine ne nalazi savitljivi tubing. Zatvaranje kanala bušotine je ostvareno kada su elastomerni elementi unutar nasuprotnih čeljusti pritisnuti jedan uz drugi. Čeljusti za zatvaranje punog presjeka sastoje se od dva nasuprotna identična čeljusna elementa koji sadrže gumene brtveće elemente ispred i iza tijela čeljusti, te povratne motke;
- b) čeljusti za rezanje - služe za rezanje savitljivog tubinga, žice i kabla koji se nalaze unutar preventerskog sklopa. Sastoje se od dva nasuprotna čeljusna elementa koji sadrže inserte za rezanje i vijke koji pridržavaju te inserte. Inserti za rezanje su napravljeni od posebnog materijala koji se nakon obrade otvrdne. Jedan par inserata za rezanje ima mogućnost odraditi preko 30 rezova;
- c) čeljusti za prihvatanje - služe za sprječavanje klizanja ili izbacivanja savitljivog tubinga u/iz kanala bušotine. Sastoje se od dva nasuprotna čeljusna elementa koji sadrže inserte za pridržavanje savitljivog tubinga. Inserti za pridržavanje savitljivog tubinga napravljeni su od posebnog materijala, te su nazubljeni i prekaljeni;
- d) čeljusti za zatvaranje prstenastog prostora - služe za brtvljenje prostora oko savitljivog tubinga i kontroliraju tlak u bušotini. Također, kao i kod čeljusnih preventera za zatvaranje punog presjeka imaju otvore za izjednačavanje tlaka iznad i ispod čeljusnog elementa.

Tlakovi između pojedinih razina preventera mogu se izjednačavati uz pomoć vodova i ventila za izjednačavanje tlaka, smještenih s vanjske strane preventera. Bočni otvor s prirubnicom omogućuje cirkuliranje fluida, te po potrebi i gušenje bušotine (Pašić, 2018).

### 3.1.3.2. Striper (preventer automatskog djelovanja)

Striper koji se nalazi između hidrauličko-mehaničkog preventerskog sklopa i glave injektora osigurava primarno brtvljenje između bušotinskog fluida pod tlakom i površine. Striper služi za dinamičko brtvljenje oko savitljivog tubinga tijekom njegova kretanja i statičko brtvljenje oko savitljivog tubinga kada je on u stacionarnom stanju. Uz pomoć prirubnice i vijaka spojen je na donju stranu glave injektora. Mehanizam za brtvljenje aktivira se hidrauličkim tlakom koji kontrolira operater ili se aktivira djelovanjem tlaka iz bušotine. S obzirom na zamjenu brtvećeg elementa postoje dvije vrste stripera: striper s pokrovnom kapom i striper s bočnim vratima. Konvencionalni striper s pokrovnom kapom se prvi koristio prilikom rada sa savitljivim tubingom. Konvencionalni striper se sastoji od klipa sa dvostrukim djelovanjem koji pritišće umetke jedan prema drugom kako bi guma brtvila prstenasti prostor oko savitljivog tubinga. Prilikom rada, skidanjem posebnog prijelaza na injektoru omogućena je zamjena gume stripera. Konvencionalni preventer automatskog djelovanja s pokrovnom kapom prikazan je na slici 3-11.



**Slika 3-11.** Konvencionalni striper (Indiamart, 2011b)

Ovaj tip konvencionalnog stripera je zamijenjen dizajnom stripera sa bočnim vratima prikazanim na slici 3-12.



**Slika 3-12.** Striper sa bočnim vratima (Exwell Oilfield, 2012)

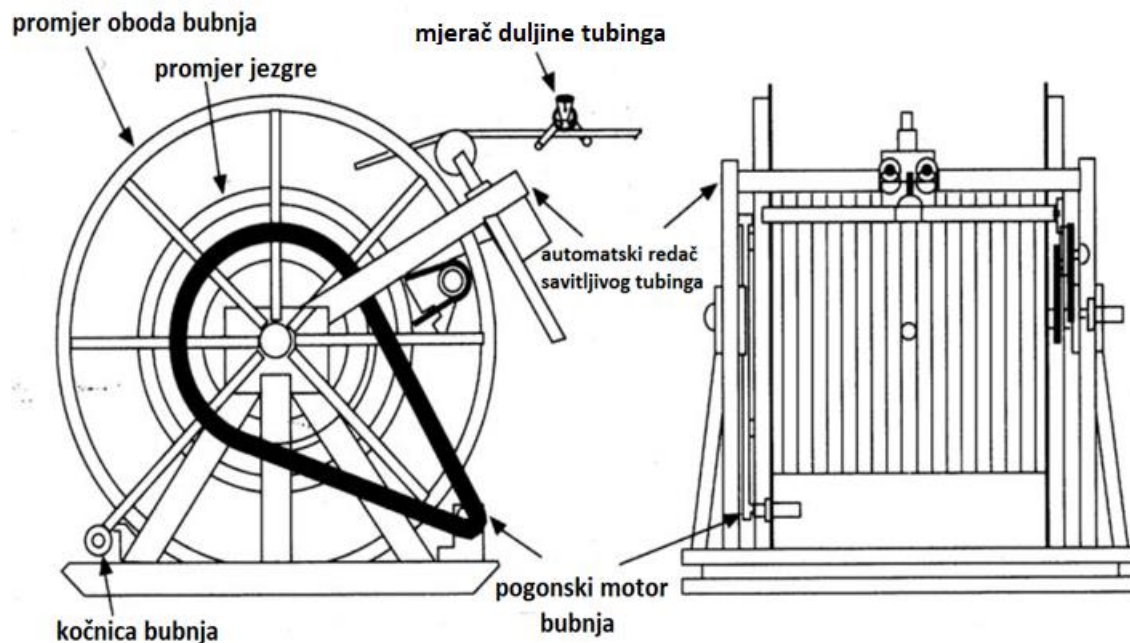
Striper s bočnim vratima osigurava jednostavniju zamjenu brtvenog elementa tijekom rada savitljivog tubinga. On je koncipiran da omogućuje zamjenu brtvila prilikom manipulacije savitljivog tubinga otvaranjem otvora na tijelu samog stripera. Bočna vrata se trebaju prvo otključati, a zatim dolazi do zamjene brtvenog elementa. Brtveći element stripera napravljen je od materijala koji je mješavina elastomera različitih karakteristika. Striper s bočnim otvorom dizajniran je za radne uvjete tlaka od 345 bar (5000 psi) do 690 bar (10000 psi). U tablici 3-1. prikazane su radne karakteristike stripera sa bočnim otvorom (Oil and gas online, 2020.a).

**Tablica 3-1.** Radne karakteristike stripera sa bočnim otvorom (Pašić, 2018)

Promjer otvora (mm)	Radni tlak (bar)	Vanjski promjer tubinga (mm)
77,8	689,5 i 1034,2	25,4 do 60,3
103,1	1034,2	31,8 do 60,3
130	344,8 i 689,5 i 1034,2	31,8 do 88,9
161,9	344,8 i 689,5	31,8 do 88,9
179,3	344,8 i 689,5	31,8 do 88,9

### 3.1.4. Bubanji s namotanim savitljivim tubingom i automatskim redačem

Primarna zadaća bubnja savitljivog tubinga je skladištenje i transport kontinuiranog niza savitljivog tubinga. Bujanji savitljivog tubinga s pogonskim sustavom je dizajniran da održava dinamičku napetost savitljivog tubinga između samog bubnja i injezione glave. Bujanji savitljivog tubinga sa ostalim pripadajućim komponentama prikazan je na slici 3-13.



**Slika 3-13.** Bujanji savitljivog tubinga sa ostalim pripadajućim komponentama (Norfleet, 2015)

#### 3.1.4.1. Pogonski sustav bubnja savitljivog tubinga

Bujanji savitljivog tubinga pokreću hidraulički motori, bilo to uz pomoć lanaca ili izravnim pogonom. Većina bubnjeva koristi lančani pogon koji povezuje hidraulički motor smješten na potpornom okviru sa velikim lančanikom koji se nalazi sa strane bubnja. Pogonski motor djeluje i kao dinamična kočnica tijekom zastoja kako bi se održala napetost savitljivog tubinga između bubnja i vodilice savitljivog tubinga. Hidraulički motor pričvršćen je na postolju, te se može prema potrebi pomicati kako bi se ostvario odgovarajući nateg lanca (Ctes, 2005).



### 3.1.4.2. Kapacitet bubnja

Kapacitet bubnja savitljivog tubinga ovisi o nekoliko čimbenika, kao što su promjer savitljivog tubinga, težina i duljina savitljivog tubinga, raspoloživi otvor bubnja na koji se namata savitljivi tubing itd. Neophodno je odabrati savitljivi tubing koji je pogodan za očekivani rad. Odabir savitljivog tubing s prevelikom kapacitetom može dovesti do prevelikih problema s troškovima i prostorom za neka odobalna postrojenja. Međutim, nedovoljan kapacitet bubnja savitljivog tubinga može rezultirati neuspješnim poslom. Uz pomoć formule 3-1 moguće je odrediti zadovoljavajući kapacitet bubnja s obzirom na karakteristike savitljivog tubinga (Drilling formulas.com, 2016):

$$L = (A + C) \times (A) \times (B) \times (K) \quad (3-1)$$

gdje su:

L - kapacitet skladištenja tubinga (m),

A - visina namotaja tubinga oko osovine bubnja (cm),

C - promjer osovine bubnja (cm),

B - širina bubnja (cm),

K - vrijednosti specifične za različite promjere tubinga (tablica 3-2).

**Tablica 3-2.** Prikaz specifičnih vrijednosti K za različite promjere tubinga (Schlumberger Dowell, 1955)

Vanjski promjer savitljivog tubinga (cm)	Vrijednost K
2,54	0,262
3,18	0,168
3,81	0,116
4,45	0,086
5,08	0,066
6,03	0,046
7,30	0,032
8,89	0,021

### 3.1.4.3. Rotirajuća spojnica

Rotirajuća spojnica je sastavni dio bubnja savitljivog tubinga. Glavna zadaća rotirajuće spojnice je da omogući cirkulaciju fluida tijekom spuštanja i izvlačenja savitljivog tubinga. Spojena je na šuplji kraj osovine bubnja na kojeg je namotan savitljivi tubing. Rotirajuća spojnica ima prirubnički otvor i otvor za jednostavnu ugradnju i uklanjanje. Višestruke brtve i kompleksan dizajn ležaja osiguravaju širok raspon brtvljenja pod tlakom, te dugotrajan i pouzdan radni vijek. Rotirajuće spojnice su dostupne pri radnim tlakovima od 345 bar (5000 psi) do 690 bar (10000 psi) za standardna i kisela radna okruženja. Na slici 3-14. prikazana je rotirajuća spojnica (Oil and gas online, 2020b).



**Slika 3-14.** Rotirajuća spojnica (Rui tai mechanical & electrical, 2013)

### 3.1.4.4. Mjerač duljine savitljivog tubinga

Mjerač duljine savitljivog tubinga obično se sastoji od malog „pogonskog“ kotača koji leži na savitljivom tubingu i polegnut je da se kotrlja po njegovoj površini u aksijalnom smjeru. Sporedni kotač koji se nalazi na suprotnoj strani od savitljivog tubinga pritišće savitljivi tubing pri prolazu između dva kotača. Zbog trenja između pogonskog kotača i savitljivog tubinga kotač se okreće dok savitljivi tubing prolazi. Mehanički digitalni brojač (poput brojača kilometara u automobilu), pričvršćen je na osovinu kotača te signalizira njegove okretaje. Digitalni prikaz na

konzoli operatera pretvara okretaje kotača u linearni razmak odnosno duljinu savitljivog tubinga koja se kreće u bušotinu. Ako dođe do proklizavanja između kotača i savitljivog tubinga, stvara se pogreška prilikom mjerenja duljine savitljivog tubinga koji je ugrađen u bušotinu (Ctes, 2005).

#### *3.1.4.5. Automatski redač*

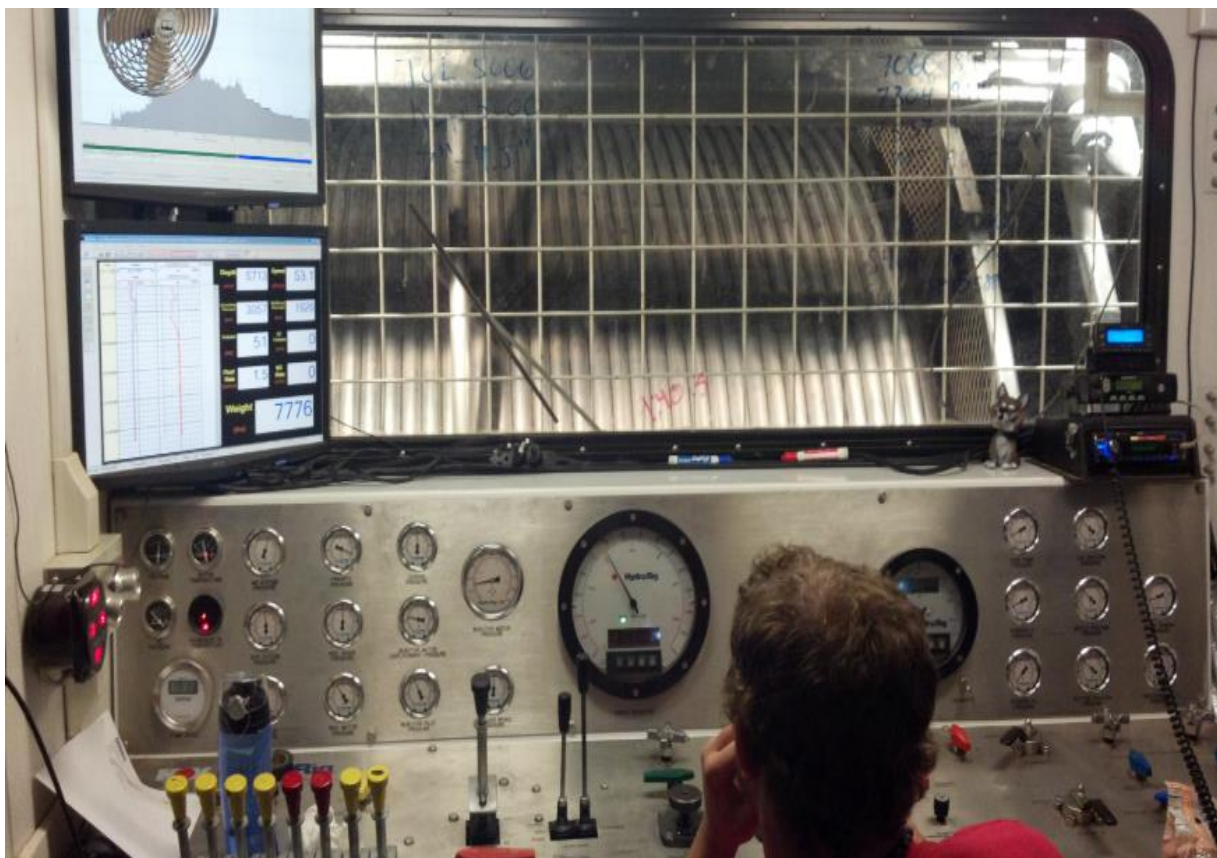
Automatski redač služi za usmjeravanje namatanja savitljivog tubinga na bubanj tijekom namatanja i osigurava glatko odmatanje savitljivog tubinga s bubnja. Pričvršćen je na glavčinu osovine bubnja. Mjedena vodilica omogućava prilagodbu različitim promjerima savitljivog tubinga. Pri pravilnom se radu za jedan okret bubnja vodilica pomakne za veličinu promjera namotane cijevi. Ako je potrebno u nekim situacijama, operator može ručno pomicati automatski redač. Automatski redač montiran na pripadajućem bubnju savitljivog tubinga prikazan je na slici 3-15. (Ctes, 2005).



**Slika 3-15.** Automatski redač (National Oilwell Varco, 2020)

### 3.1.5. Kontrolna kabina

Kontrolna kabina sadrži sve potrebne komande za upravljanje rada postrojenja sa savitljivim tubingom. Obično se kontrolna kabina nalazi iza bubnja savitljivog tubinga. Međutim, može doći do situacije da se kontrolna kabina ne može postaviti iza bubnja savitljivog tubinga, tada se kontrolna kabina može premjestiti na drugo mjesto gdje će se operateri osjećati sigurno tijekom rada postrojenja sa savitljivim tubingom. Razina upravljanja i instrumentacije ovise o vrsti postupka koji se izvodi. Kontrolna kabina ili kabina operatera sadrži konzolu s analognim mjeracima, digitalnim preglednikom, te električne i hidrauličke komande potrebne za rad postrojenja sa savitljivim tubingom, prikazano na slici 3-16 (Drilling formulas.com, 2016).



**Slika 3-16.** Kontrolna kabina postrojenja za rad sa savitljivim tubingom (Drilling formulas.com, 2016)

Kontrolna kabina postrojenja za rad sa savitljivim tubingom je mjesto gdje se može upravljati svim radnim procesima, te osigurati njihovo nadziranje i bilježenje svih relevantnih podataka.

To uključuje (Smape, 2012):

- ulaznu i izlaznu brzinu injektorske glave;
- rad bubnja i automatskog redača savitljivog tubinga;
- otvaranje i zatvaranje hidrauličko-mehaničkog preventerskog sklopa;
- kontrolu tlaka unutar stripa;
- brzinu kretanja i duljinu savitljivog tubinga;
- težinu savitljivog tubinga;
- unutarnji cirkulirajući tlak savitljivog tubinga.

## 4. PRIMJENA POSTROJENJA ZA RAD SA SAVITLJIVIM TUBINGOM

S obzirom da se preko 70% svjetske proizvodnje nafte i plina proizvodi iz starih polja, ne čudi činjenica da velike naftne i plinske kompanije razmatraju načine na koje mogu povećati proizvodnju iz bušotina na postojećim poljima ili povećanja proizvodnje iz specifičnog naftnog ili plinskog polja unatoč krivulji prirodnog pada proizvodnje. Mnogo je načina na koje operator može poboljšati iscrpak nafte i plina iz određenog ležišta kao što su primjena nekih od prinudnih načina podizanja kapljevine, utiskivanjem kemikalija i sl., ali za ovo poglavlje fokus će biti na primjeni postrojenja za rad sa savitljivim tubingom. Glavne prednosti korištenja savitljivog tubinga za izvođenje različitih zahvata u bušotini su sljedeće (Petrowiki, 2015f):

- izvođenje različitih bušotinskih operacija prilikom neprekidne cirkulacije fluida;
- sposobnost rada s prisutnim površinskim tlakom (nije potrebno gušenje bušotine);
- minimizirano oštećenje formacije kada se izvodi operacija za koju nije potrebno gušenje bušotine;
- smanjeno vrijeme manevra u usporedbi s klasičnim remontnim postrojenjem jer nema potrebe za spajanjem ili odspajanjem klasičnog niza uzlaznih cijevi koji se u toj situaciji koristi kao radni niz;
- povećana sigurnost osoblja zbog smanjenih potreba za rukovanjem cijevnim alatima;
- postrojenje za rad sa savitljivim tubingom je vrlo mobilno i kompaktno, te je potrebno manje radnog osoblja za rad s njime;
- sposobnost izvođenja kontinuiranih operacija, posebno dok je savitljivi tubing u pokretu.

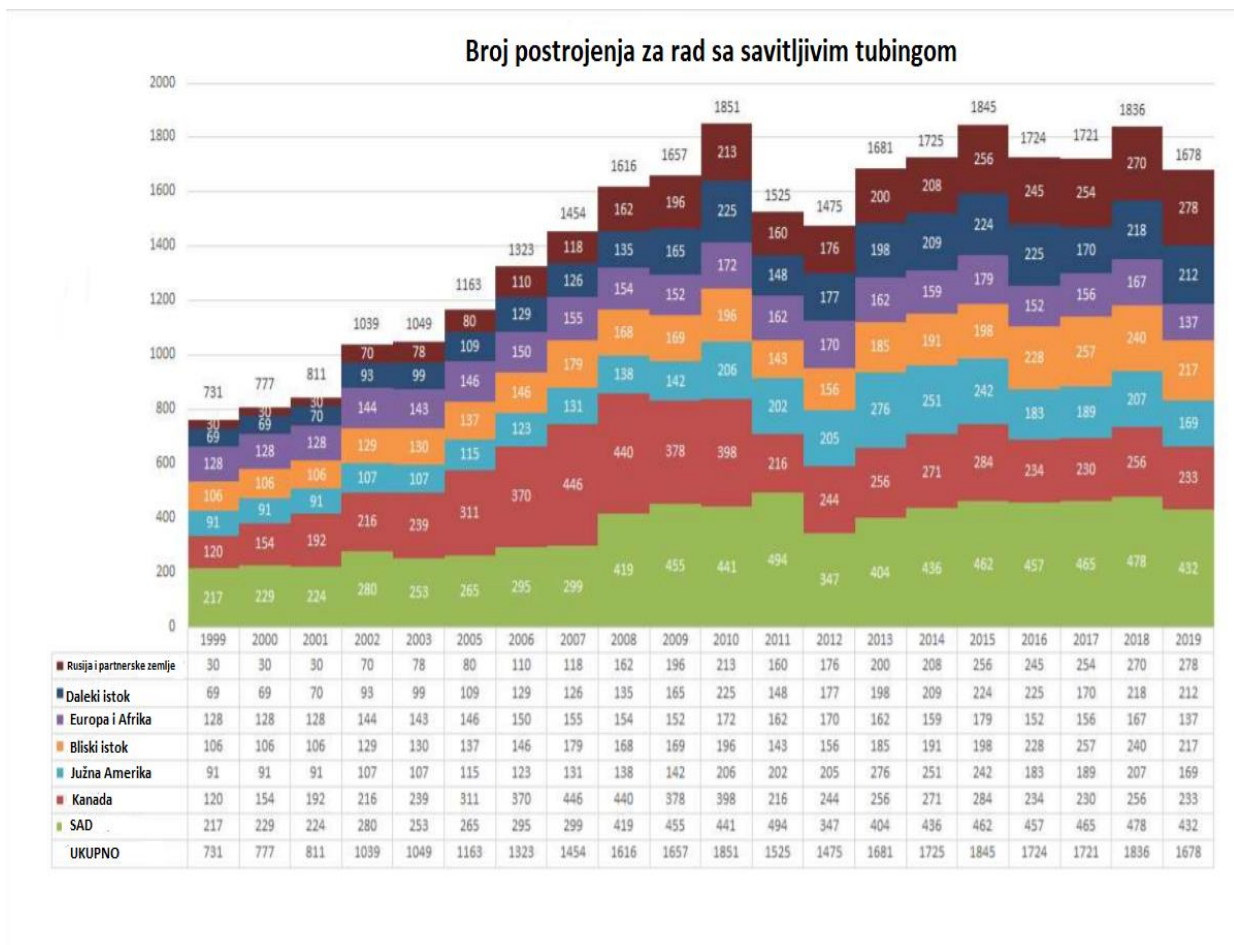
Napredak u tehnologiji izrade savitljivog tubinga i predviđanje problema vezanih uz zamor materijala smanjili su rizik deformacije i oštećenja savitljivog tubinga. Također, postoje i ograničenja u korištenju savitljivog tubinga, a neka od njih su (The antech blog, 2017):

- radni vijek korištenja savitljivog tubinga - prvenstveno zbog zamora materijala koji nastaje zbog savijanja koja se događaju kada se savitljivi tubing namotava ili odmotava s bubnja i kreće preko vodilice savitljivog tubinga, odnosno injektorskog sklopa. Ostali

čimbenici kao što su korozija, kiselo radno okruženje, također će utjecati na radni vijek savitljivog tubinga;

- ograničenja vezana uz tlak koji djeluje na savitljivi tubing – ograničenja s obzirom na tlak rasprskavanja i na tlak gnječenja;
- ograničenja vezana uz promjer i ovalnost savitljivog tubinga - potrebno je redovito kontrolirati savitljivi tubing kako bi se osiguralo da ne dođe do pojave ovalnosti ili mehaničkog oštećenja.

Na slici 4-1 prikazan je broj postrojenja za rad sa savitljivim tubingom s obzirom na svjetske regije u razdoblju od 1999. do 2019. godine.



**Slika 4-1.** Broj postrojenja za rad sa savitljivim tubingom u svijetu (Icota, 2019)

Tržište savitljivog tubinga jako se brzo povećava i širi širom svijeta. Sjevernoamerička regija ostaje najveće tržište savitljivog tubinga, a slijede je Europa, Azijsko-pacifička regija i Bliski Istok. Razvoj novih polja u regiji Bliskog Istoka i Afrike također pruža poticaj za veću primjenu postrojenja za rad sa savitljivim tubingom i u tim regijama. Upotreba savitljivog tubinga sve se više širi i imati će veliku ulogu u budućnosti. Postoji širok spektar operacija za koje se koristi postrojenje za rad sa savitljivim tubingom, a one najvažnije su:

- pročišćavanje i ispiranje kanala bušotine,
- bušenje,
- instrumentacija,
- mjerenje podataka,
- perforiranje.

#### **4.1. Pročišćavanje i ispiranje kanala bušotine**

Najčešće primjena savitljivog tubinga uključuju operacije čišćenje pijeska ili učinkovito uklanjanje krutih tvari iz kanala bušotine. Proces čišćenja pijeska ili krutih tvari iz bušotine zahtijeva utiskivanje tekućine u bušotinu, podizanje nakupljenih krutih tvari uz pomoć tekućine za ispiranje i naknadno njihovo iznošenje na površinu. U većini slučajeva tekućina za ispiranje s krutim tvarima se dovodi u površinske prihvatne rezervoare s dovoljnim volumenom da se krutine istalože iz tekućine. Jedan od najvažnijih čimbenik pri projektiranju procesa čišćenja krutih tvari je pravilan odabir sastava tekućine za čišćenje i ispiranje. Tekućine koje se koriste za čišćenje i ispiranje u sastavu alata savitljivog tubinga kategoriziraju se kao kompresibilne i nekompresibilne. U bušotinama koje su pod velikim tlakom ili su osjetljive na tekućinu, dušik koji se pumpa velikom brzinom može se koristiti za čišćenje krutih tvari kroz prstenasti prostor do površine. Mehanizam uklanjanja krutih tvari u bušotini izravno ovisi o brzini povratnog toka dušika kroz prstenasti prostor. Prilikom uspostavljanja dovoljne uzlazne brzine za čišćenje, treba obratiti pažnju na negativan erozivni učinak koji može oštetiti proizvodni tubing, savitljivi tubing, erupcijski uređaj i ostalu opremu na površini. Zbog erozivnih poteškoća, proces uklanjanja krutih tvari korištenjem dušika trebao bi se smatrati zadnjom opcijom.



#### 4.1.1. Nekompresibilni fluidi za čišćenje i ispiranje

Nekompresibilni fluidi za čišćenje i ispiranje su uglavnom na bazi vode ili ugljikovodika. Ova vrsta čišćenja uz pomoć nekompresibilnih tekućina je manje složena u odnosu na čišćenje uz pomoć kompresibilnih tekućina. Odabrana tekućina za čišćenje trebala bi biti ona koja omogućuje uklanjanje krutih tvari. Željena tekućina za čišćenje je ona koja istaložene krute tvari transportira iz bušotine kroz prstenasti prostor. Ovisno o veličini vanjskog promjera savitljivog tubinga, njutnovske tekućine su općenito adekvatne za obavljanje čišćenja unutar cijevi savitljivog tubinga. Uglavnom se koriste biopolimerni gelovi ili gelirani ugljikovodici. Međutim, kod cirkuliranja tekućine za pročišćavanje unutar tubinga ili prstenastog prostora velikog promjera (npr. otvoreni kanal bušotine), dolazi do smanjenja uzlazne brzine koja je obično nedovoljna za transport krutih tvari ili čvrstih četica iz bušotine.

#### 4.1.2. Kompresibilni fluidi za čišćenje i ispiranje

Proces čišćenja i ispiranja sa savitljivim tubingom uz pomoć kompresibilnih tekućina je mnogo složeniji. Kompresibilne tekućine sadrže različite frakcije plina u svom sastavu i odabrane su za čišćenje i ispiranje u formacijama koje su pod niskim tlakom ili tamo gdje brzina protjecanja tekućine za čišćenje u prstenastom prostoru nije dovoljna za podizanje krutih tvari. Volumen kompresibilne tekućine se mijenja u odnosu na temperaturu i tlak u kanalu bušotine; prema tome, brzine u prstenastom prostoru pri povratku tekućine na površinu nisu iste po cijeloj duljini prstenastog prostora kanala bušotine. Jednom kada se uspostavi cirkulacija u procesu čišćenja uz pomoć kompresibilne tekućine, pumpe na površini moraju osigurati dovoljan tlak da se nadvladaju ukupni gubici tlaka zbog trenja u sustavu. U tom stanju, kompresibilna tekućina ima visoki tlak i zauzima minimalan volumen. Kad jedinični volumen kompresibilne tekućine napusti kraj savitljivog tubinga, dolazi do povećanja tlaka u prstenastom prostoru. Opadajući hidrostatski tlak tekućine u prstenastom prostoru, zajedno s smanjenjem gubitka tlaka zbog trenja u sustavu, omogućuje plinu unutar tekuće faze da se širi. Plin koji se širi unutar tekuće faze uzrokuje povećanje uzlazne brzine u prstenastom prostoru. Za modeliranje protjecanja ovakvih fluida prstenastim prostorom nužno je korištenje složenih matematičkih proračuna. U tim se slučajevima preporučuje korištenje računalnog programa koje omogućava operateru na postrojenju za rad sa savitljivim tubingom procjenu učinka kompresibilnog fluida.

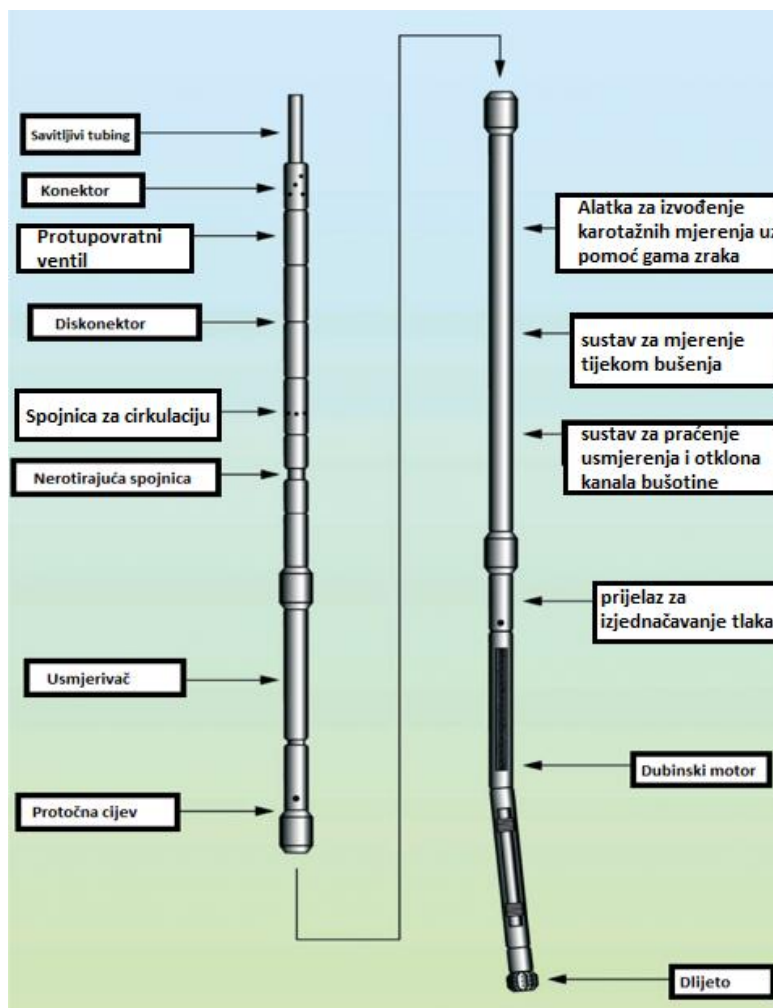
Kompresibilni fluidi su suhi dušik i pjena (vodena ili na bazi ulja). Pjena se općenito koristi za čišćenje i ispiranje krutih tvari u bušotini koja je pod tlakom. Deformacija stabilne pjene najviše podsjeća na Bingham plastični fluid u kojem se mora postići naprezanje da bi se pokrenulo kretanje fluida (Petrowiki, 2015f).

#### **4.2. Bušenje uz pomoć savitljivog tubinga**

Bušenje uz pomoć savitljivog tubinga učinkovito se koristi više od 20 godina u naftnoj industriji. Sastav alatki na dnu savitljivog tubinga omogućuje bušenje u vertikalnim, koso usmjerenim i horizontalnim bušotinama. Kada se planira bušenje uz pomoć savitljivog tubinga tada je potrebno osigurati potrebnu opremu koju zahtjeva operacija bušenja. Složeni postupci bušenja zahtijevaju:

- opremu za rukovanje savitljivim tubingom;
- točne odredbe za rukovanjem sastavom alata;
- savitljivi tubing velikog promjera;
- veći i sigurniji preventerski sklop;
- dodatnu opremu za obradu fluida za ispiranje kanala bušotine.

Najčešća primjena tehnologije bušenja uz pomoć savitljivog tubinga je ponovno bušenje (dobašivanje kanala) unutar već postojećih bušotina (često kroz tubing postojeće bušotine) i bušenje u uvjetima podtlaka, te bušenje kontroliranim tlakom ili pri niskom tlaku na dnu bušotine. Sastav alata savitljivog tubinga pri bušenju sadrži dubinski motor koji se nalazi iznad dlijeta, te se bušenje odvija pri velikm brzinama okretaja motora i malom opterećenju na dlijetu. Sastav alata za bušenje uz pomoć savitljivog tubinga prikazan je na slici 4-2.



**Slika 4-2.** Sastav alata za bušenje savitljivim tubingom (Petrowiki, 2015g)

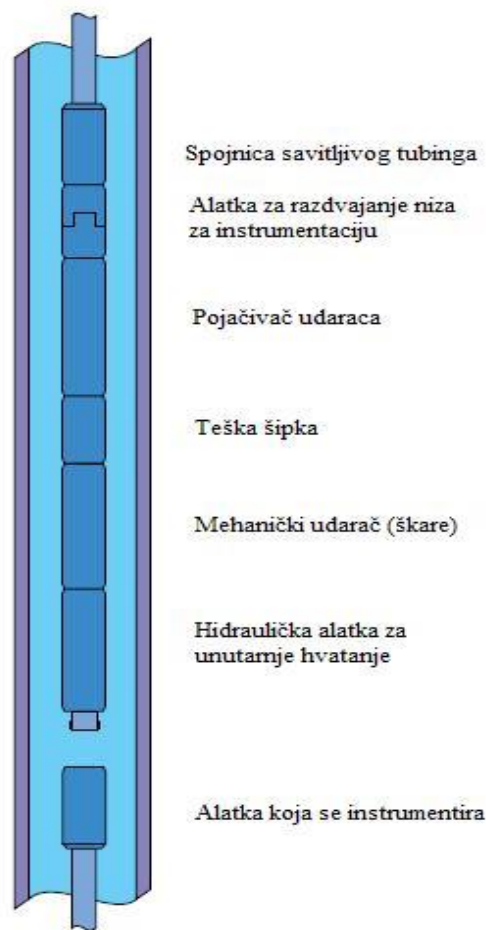
Bušenje u uvjetima podtlaka ili čak bušenje pri kontroliranom tlaku puno je lakše upotrebom postrojenja za rad sa savitljivim tubingom. Za razliku od uobičajenog bušenja, nema potrebe za povezivanjem niza alata, te se time ne krši ravnoteža tlakova. Bušenje u uvjetima podtlaka omogućuje istovremeno pridobivanje ležišnog fluida, što znatno povećava ekonomičnost rada. Bušenje uz pomoć savitljivog tubinga se koristi širom svijeta u regijama poput Aljaske (SAD), Kanade i zemalja Bliskog Istoka, uključujući Ujedinjene Arapske Emirate, Oman i Saudijsku Arabiju. Tipične primjene savitljivog tubinga uključuju bušenje kroz iscrpljena ležišta, nekonvencionalne plinske škriljavce i ležišta ugljena u kojim je metan (Petrowiki, 2015g).

### 4.3. Instrumentacija

Instrumentacija podrazumijeva ukljanjanje oštećene, odbačene ili zaglavljene opreme i alatki iz kanala bušotine. Sposobnost savitljivog tubinga da cirkulira tekućinu kroz alatke za instrumentiranje i da stvara dovoljnu silu za vađenje zaostalih alatki iz bušotine čini ga mnogo isplativijim postrojenjem za izvođenje ovih operacija u odnosu na ostala postrojenja. Instrumentacija uz pomoć savitljivog tubinga može se izvoditi dok je bušotina pod tlakom te u u koso usmjerenim i horizontalnim bušotinama. Proces instrumentacije može biti dovršen vrlo brzo, odnosno u roku od 1 do 3 dana i bušotina se može vratiti proizvodnji. Usluga instrumentacije uz pomoć alata na žici je lako dostupna i najučinkovitije je sredstvo za obavljanje mnogih operacija unutar bušotine. Uz to, brojni alati i tehnike instrumentacije su razvijeni specifično za sustav alata na žici. Međutim, instrumentacija uz pomoć alata na žici ograničena je s obzirom na konstrukciju kanala bušotine. Povećani otklon kanala bušotine ograničava mogućnost učinkovite instrumentacije i može stvoriti probleme s iznošenjem zaostalog alata. Savitljivi tubing ima tri glavne prednosti u odnosu na instrumentaciju uz pomoć alata na žici:

- ima mogućnost cirkulacije raznih radnih fluida, uključujući dušik i kiselinu, pri visokim tlakovima za uklanjanje ili otapanje pijeska, vapnenca i ostalih krhotina s vrha alatki koje je potrebno instrumentirati;
- ima sposobnost stvaranja velikih aksijalnih sila u ravnim ili jako zakrivljenim bušotinama za povlačenje alata koji je pretežak za opremu na žici;
- može izvoditi prethodno dvije opisane operacije istovremeno.

Za simultano izvođenje instrumentacije uz ispiranje kanala bušotine nužno je opremiti niz savitljivog tubinga specijaliziranim alatkama koje to omogućavaju. Specifičan sastav alata za proces instrumentiranja uz pomoć savitljivog tubinga prikazan je na slici 4-3 (Fowler i Hilts, 1993).



**Slika 4-3.** Sastav alatki za instrumentaciju pomoću savitljivog tubinga (Ctes, 2005)

Postupak instrumentacije uz pomoć savitljivog tubinga uključuje sljedeće korake:

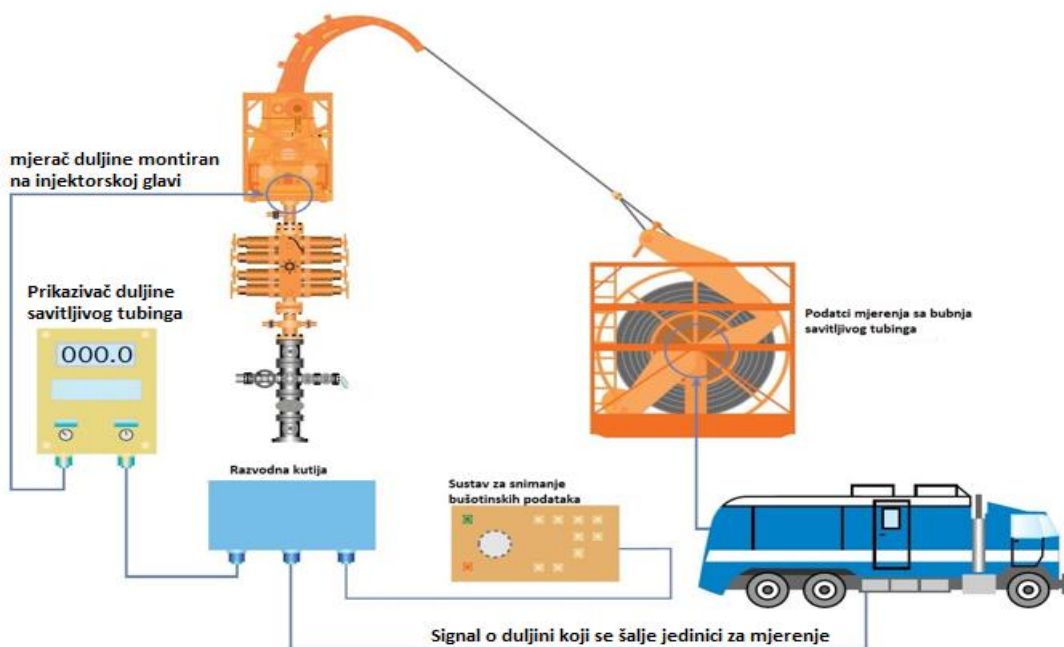
1. spajanje površinske opreme i tlačne probe;
2. test provjere povlačenja i potiska nad spojnicom savitljivog tubinga;
3. spajanje alatki za instrumentiranje;
4. provjera tlaka na bušotinskoj glavi i alatu za instrumentiranje na površini;
5. spuštanje savitljivog tubinga sa alatom za instrumentaciju za izvršenje operacije;
6. Praćenje da li je instrumentacija uspješna i da li je odgovarajući alat prihvaćen, uz pomoć očitavanja tlaka na pumpama i promjene težine niza na injektorskom sklopu (Grifco, 2020).

#### 4.4. Izvođenje mjerenja uz pomoć savitljivog tubinga

Poput bušenja uz pomoć savitljivog tubinga, mjerenje uz primjenu niza savitljivog tubinga (engl. *logging*) razvilo se također tijekom 90-ih godina prošlog stoljeća. Jedinica savitljivog tubinga ima mogućnost mjeriti podatke u horizontalnim i koso usmjerenim bušotinama zbog iznimne krutosti samog savitljivog tubinga. Uz to, konstrukcija cijelog sustava omogućuje istovremeno mjerenje podataka i cirkulaciju fluida. Uspješna primjena savitljivog tubinga zahtijeva pouzdanu povezanost između sklopa niza savitljivog tubinga i jedinice za mjerenje (engl. *logging unit*). Da bi se dobile jasne informacije o podacima na nekoj dubini u stvarnom vremenu, putem odašiljača šalju se podaci o dubini s injektorske glave, te se putem posebnog sučelja prenosi signal do jedinice za mjerenje. Nadzorni operateri prate te iste podatke i bilježe parametre koji se odnose na cirkulaciju i sami savitljivi tubinga. Moderne injektorske glave na postrojenju za rad sa savitljivim tubingom sadrže jedinicu za mjerenje u sklopu svoje konstrukcije. Injektorska glava učvršćuje žicu za mjerenje, omogućava cirkulaciju tekućine kroz dvostruki ventil tijekom mjerenja i omogućuje električnu vezu za prijenos podataka. U osnovi, mjerenje savitljivim tubingom se ne razlikuje mnogo od jedinice na žici. Međutim, savitljivi tubing je krutiji od žice, pa ne dolazi do istezanja, a injektorska glava osigurava stabilnu brzinu spuštanja i podizanja tubinga u/iz bušotine. Izvorno su alati za mjerenje razvijeni za prikupljanje petrofizičkih podataka s dubinom. Današnji standardi i visoka tehnologija omogućuju ugradnju uređaja u bušotine manjeg promjera. Na primjer, dvostruki uređaj za mjerenje laterološke otpornosti (engl. *Dual Laterolog Resistivity tool*) i kombinirani uređaj za mjerenje gustoće stijene (engl. *Litho-Density tool*) nalaze se u sklopu koji je promjera 7 cm (2 ¾”), odnosno 8,9 cm (3 1/2”). Pored toga, dizajnirani su novi instrumenti, poput uređaja za uzimanje uzoraka stijene (engl. *Slimhole Repeat Formation Tester tool*), uređaja za mjerenje zasićenosti ležišta (engl. *Reservoir Saturation Tool*) i okretne puške (engl. *Pivot Gun*) za perforiranje. Danas se savitljivi tubing najčešće koristi za mjerenje proizvodnih parametara, a ponekad i u kombinaciji s alatom za perforiranje. Niz alata za praćenje proizvodnih parametara mjeri niz parametara, uključujući protok, gustoću fluida, tlak i temperaturu. Mjerenje proizvodnih parametara u koso usmjerenim ili horizontalnim bušotinama predstavlja ogroman izazov. Također, mjerenje proizvodnih parametara mora biti dovoljno fleksibilno da odgovori na promjene u ponašanju

bušotine. Karakterističan proces mjerenja proizvodnih parametara pomoću opreme na nizu savitljivog tubinga uključuje sljedeće korake:

- postavljanje opreme i ispitivanje opreme na tlak;
- spuštanje savitljivog tubinga u bušotinu i zaustavljanje da bi se provjerila težina savitljivog tubinga;
- usklađivanje dubine s referentnim zapisnikom koristeći gama zračenje;
- mjerenje u bušotini dok je zatvorena;
- mjerenje u oba smjera kretanja savitljivog tubinga u/iz bušotine u 4 prolaza pri brzinama od 0,2, 0,3, 0,4, 0,5 m/s;
- praćenje ponašanja bušotine i obavljanje stacionarnih mjerenja kako bi se mogao uočiti dotok;
- izvlačenje alata iz bušotine.



**Slika 4-4.** Jedinica za mjerenje u sklopu savitljivog tubinga (Geophysics sketch note, 2018)

Još jedna mogućnost vezana uz mjerenje proizvodnih parametara pomoću niza savitljivog tubinga je upotreba neutrona i otopine boraks (engl. *borax solution*). Otopina boraks se pumpa kroz prstenasti prostor oko savitljivog tubinga pod tlakom većim od tlaka ležišta, ali ispod tlaka

frakturiranja. Budući da je otopina boraksa puno učinkovitija od ležišnog fluida u usporavanju neutrona, stoga otopina boraksa pod tlakom lakše ulazi u visokopropusne zone koje je lakše otkriti uz pomoć neutronske karotaže. Nakon što je identificiran proizvodni profil bušotine i potencijalne zone zasićene ugljikovodicima, moguće je izvršiti operaciju perforiranja uz pomoć puške za perforiranje u sklopu savitljivog tubinga (Geophysics sketch note, 2018).

#### **4.5. Perforiranje**

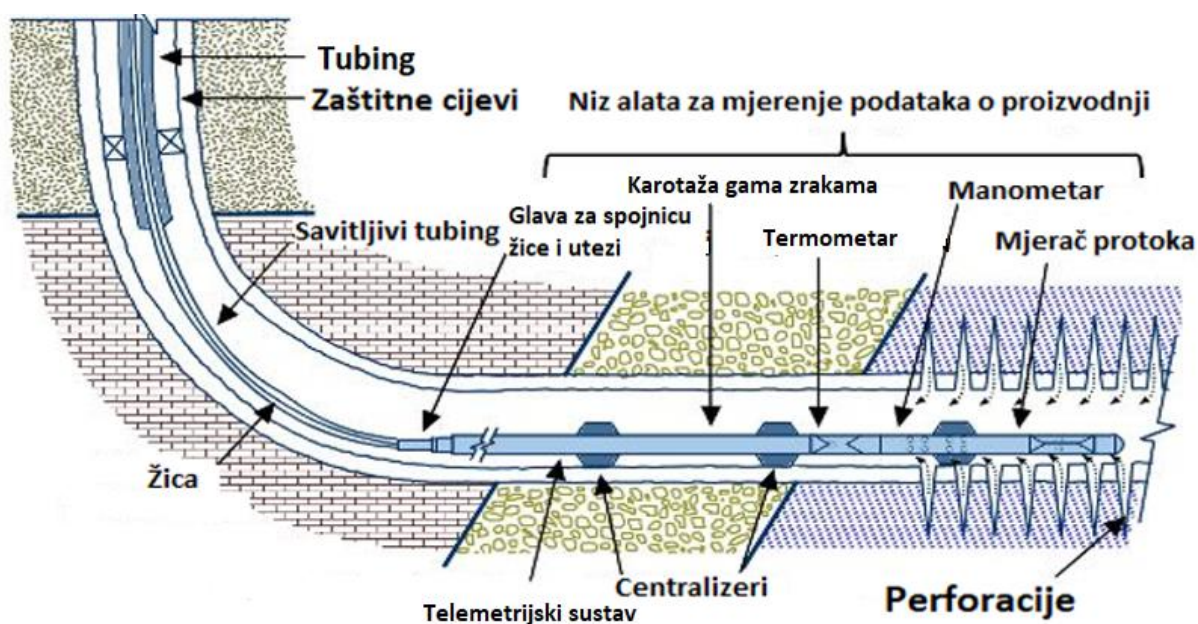
Iako je poznat po fleksibilnosti, savitljivi tubing također pruža krutost i čvrstoću omogućujući veću izdržljivost na vlačnu i tlačnu silu s obzirom na klasično postrojenje, što je glavna operativna prednost pri perforiranju u koso usmjerenim i vodoravnim bušotinama ili kod upotrebe duljih puški za perforiranje. Dodatna prednost je i mogućnost točnog određivanja dubine na kojoj se nalaze alatke koje je ostvarena integriranjem lokatora zaštitinih cijevi i detektora gama zraka. Da bi se osigurala pokrivenost ciljane zone, perforiranje savitljivim tubingom u stvarnom vremenu je dostupno za jednostruko perforiranje s preciznom kontrolom dubine, kontrolom hidrostatske ravnoteže, izbjegavanjem oštećenja formacije i prodor fluida u formaciju. Perforiranje savitljivim tubingom je idealno za aktivne bušotine. Na odobalnim bušotinama, lubrikator definira duljinu puške koje se može upotrijebiti u pojedinoj operaciji. U bušotinama gdje je smanjeni slojni tlak ubrizgava se dušik kako bi se ostvario podtlak i odmah nakon perforiranja ostvarila proizvodnja. Rezultirajući diferencijalni tlak je sličan onome koji nastaje tijekom operacija uz pomoć plinskog lifta. Postoji nekoliko načina aktiviranja puške za perforiranje na nizu savitljivog tubinga, uključujući:

- hidrauličko aktiviranje puške za perforiranje;
- ubacivanjem kugle za aktiviranje;
- cirkulacijom tekućine;
- električno, s krutom žicom unutar savitljivog tubinga, koja koristi standardne alate za korekciju.

Savitljivi tubing omogućava protiskivanje tekućina za stimulaciju bez rizika od oštećenja žičnog kabela (Schlumberger, 2020b).

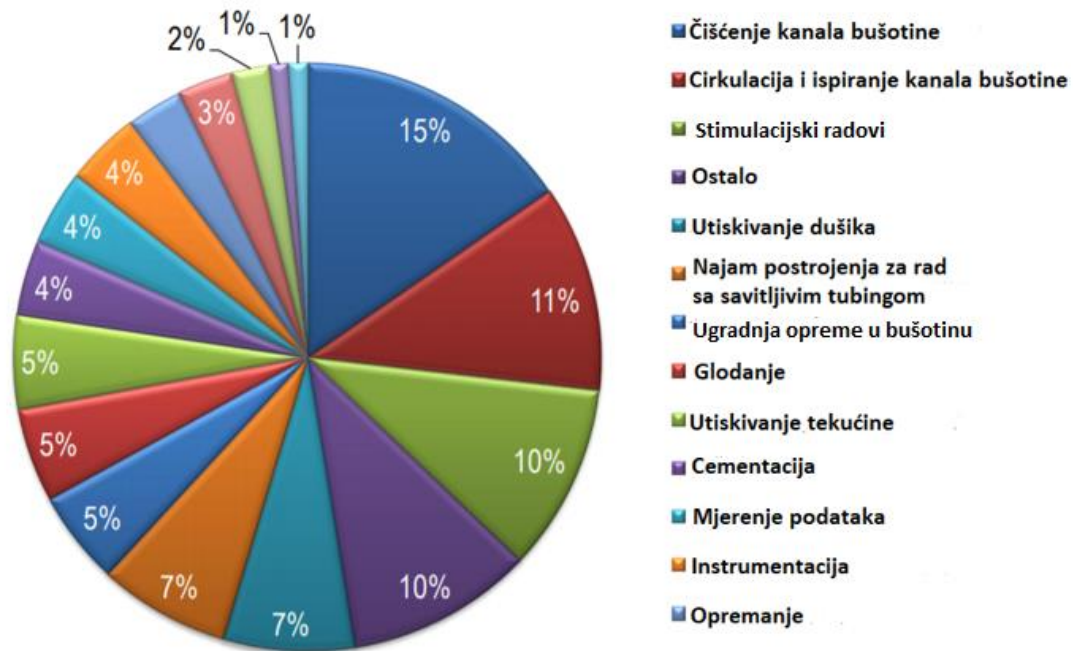


Mehanizam za detonaciju puške perforatora hidrauličkim načinom bazira se na kombinaciji primijenjenog tlaka kroz savitljivi tubing i hidrostatskog tlaka. Kako se tlak u savitljivom tubingu povećava, klip se ubacuje u inicijator koji detonira punjenje puške. Ovisno o uvjetima rada, puška za paljenje može biti opremljena cirkulacijskim priključkom prije spuštanja opreme za perforiranje u bušotinu, ili može ostati zatvoreni sustav koji sprječava gubitak tekućine u formacije. Za zatvoreni sustav koristi se hidraulički rastavljač na savitljivom tubingu koji djeluje uz pomoć diferencijalnog tlaka između savitljivog tubinga i proizvodnog tubinga. Na slici 4-5. je prikazan savitljivi tubing s pratećom dubinskom opremom neophodnom za perforiranje horizontalne bušotine (Schlumberger, 2020b).



**Slika 4-5.** Izrada perforacija primjenom puške perforatora na savitljivom tubingu (Petroskills, 2018)

Prethodno navedene mogućnosti primjene savitljivog tubinga govore u prilog njegovoj fleksibilnosti, ali i važnosti za različite nove mogućnosti primjene ove tehnologije u budućnosti. Prema podacima kompanije Schlumberger, prikazanim na slici 4-6 je prikazana postotna raspodjela operacija za koje se sve koristi savitljivi tubing.



**Slika 4-6.** Operacije za koje se primjenjuje savitljivi tubing (Schlumberger, 2016c)

Samim time je jasno kako savitljivi tubing ima izrazito važnu ulogu u širom spektru operacija koje se obavljaju u naftnoj i plinskoj industriji. S obzirom na veliko područje operacija gdje je primjenjiv savitljivi tubing, sljedeće poglavlje opisuje daljnji razvoj ove tehnologije koja uključuje primjenu optičkih kablova.

## **5. PRIMJENA OPTIČKIH KABLOVA NA POSTROJENJIMA ZA RAD SA SAVITLJIVIM TUBINGOM**

Razvojem tehnologija došlo je do novih inovacija u primjeni postrojenja za rad sa savitljivim tubingom. S obzirom na širok spektar operacija za koje se koristi savitljivi tubing, bilo je potrebno implementirati neka nova tehnološka rješenja kako bi se postojećim i budućim operacijama koje se standardno obavljaju na terenu smanjilo potrebno vrijeme za izvođenje tih operacija, a istovremeno povećala ekonomičnost rada postrojenja sa savitljivim tubingom. Tehnologije koje se najbrže razvijaju i potencijalno imaju veliku primjenu, te se istovremeno koriste uz postojeće operacije su hibridna tehnologija savitljivog tubinga i sustav optičkih vlakana pomoću kojih je moguće nadzirati izvođenje operacije i donošenje odluka u stvarnom vremenu. Ova tehnologija omogućava prikupljanja podataka i donošenja odluka u istom trenutku kada im uređaj koji se nalazi u kanalu bušotine šalje signal na površinu.

### **5.1. Mogućnost istovremene primjene savitljivog tubinga i optičkih vlakana pri izvođenju operacija u bušotini**

Hibridna tehnologija koja kombinira istovremenu primjenu savitljivog tubinga i optičkih vlakana nudi mogućnost brzog prijenosa informacija i mogućnost nadziranja i upravljanja pojedinim operacijama u stvarnom vremenu. Prijašnja tehnološka rješenja uključivala su primjenu opreme na žici za izvedbu operacija u stvarnom vremenu što je podrazumijevalo zaustavljanje proizvodnje i mnogobrojne dodatne zahvate kako bi se izbjegli operativni problemi. Primjenom optičkih vlakana u kombinaciji sa savitljivim tubingom pomaže se u uklanjanju zahtjeva za zatvaranjem bušotine i ograničenjem protoka fluida, kako bi se provele određene operacije u bušotini. Već dugi niz godina postrojenja za rad sa savitljivim tubingom koriste se na aktivnim i neaktivnim bušotinama za obavljanje remontnih radova, kao i za uobičajene operacije mjerenja u kanalu bušotine. Hibridne tehnologije postale su poželjna metoda za obavljanje operacija u bušotini zbog karakteristika opreme i svestranosti, čime je uklonjen zahtjev za angažiranjem nekoliko različitih postrojenja na lokaciji za obavljanje određene operacije. Većina tradicionalnih metoda dobivanja podataka iz bušotine u kojoj se obavljaju određene operacije uključuju konvencionalnu primjenu memorije za pohranu rezultata

mjerjenja i savitljivog tubinga s instaliranim električnim kabelom. Ipak, korištenje memorije za pohranu rezultata mjerenja zahtijeva više od dva spuštanja niza savitljivog tubinga tijekom obavljanja jedne operacije, a na točnost korelacije s dubinom utječe produljenje cijevi. Međutim, to se može riješiti provođenjem korelacije s dubinom u stvarnom vremenu. Tijekom prethodnih 30 godina, primjenom električnog kabela unutar savitljivog tubinga uspjeli su se dobiti podaci iz bušotine u stvarnom vremenu, ali postrojenja za rad sa savitljivim tubingom kroz koji je provučen električni kabel imaju ograničenja koja ograničavaju njihovu primjenu tijekom više operacija u jednom spuštanju alata u kanal bušotine. Ograničenja uključuju značajno povećanje težine niza cijevi, ograničenja protoka kroz cijev i izloženost fluidima koji mogu utjecati na integritet kabela. Ta se ograničenja mogu prevladati uvođenjem optičkog kabela unutar cijevi savitljivog tubinga. Vlaknasto-optički kabel koristi se za prijenos informacija iz bušotine na površinu bez utjecaja na rad samog postrojenja ili specifične zahtjeve s obzirom na operaciju koja se izvodi, kao što su upotreba korozivnih i abrazivnih tekućina, mogućnost spuštanja kuglice i brzina cirkulacije. Ovo tehnološko rješenje rezultira također minimalnim utjecajem na težinu savitljivog tubinga. Dobiveni podaci omogućavaju izvođenje operacija pomoću savitljivog tubinga kao što je to npr. bušenje uz istovremeno praćenje podataka u stvarnom vremenu (Higuera et al., 2020).

#### 5.1.1. Sustav optičkih vlakana za prijenos podataka u stvarnom vremenu

Sustav optičkih vlakana za prijenos podatka u stvarnom vremenu počeo se koristiti na postrojenjima sa savitljivim tubingom 2015. godine i sastoji se od integriranog sustava koji uključuje savitljivi tubing opremljen kablom od optičkih vlakana, površinsku opremu i računalni program. Računalni program za konvencionalnu jedinicu je nadograđen te uključuje funkcije koje dozvoljavaju vizualizaciju, promatranje i interpretaciju bušotinskih parametara zabilježenih pomoću savitljivog tubinga opremljenog optičkim vlaknima. Površinska oprema uključuje sustav pod tlakom koji omogućava kontinuiranu cirkulaciju fluida kroz savitljivi tubing istovremeno izolirajući kabel od optičkih vlakana. Time je omogućeno da se optički kabel prekine i spoji na prijemnu kutiju koja je ugrađena unutar bubnja. Unutar niza savitljivog tubinga ugrađen je 4 milimetarski dvostruki optički kabel. Optički kabel koristi se za prijenos informacija iz bušotine kroz savitljivi tubing na površinu, bez utjecaja na radne parametre. Dubinski sklop preko kojeg je optički kabel spojen na mjernu opremu se sastoji od više modula

koji podnose temperature do 177 °C i dostupni su u promjerima od 5,4 cm do 8,6 cm (Higuera et al., 2020).

### 5.1.2. Savitljivi tubing opremljen optičkim kabelom

Tehnologija savitljivog tubinga i optičkog kabela koja omogućava prijenos podataka u stvarnom vremenu predstavlja korak naprijed u naftnoj i plinskoj industriji, time što integrira prijenos podataka električnim i optičkim putem u jednu jedinstvenu cjelinu. Sustav je u potpunosti kompatibilan s žičanim i mehaničkim alatima, a istovremeno zadržava prednosti i mogućnosti optičkog kabela, nudeći neograničenu fleksibilnost u radu. Tehnologija hibridnog savitljivog tubinga u stvarnom vremenu uključuje savitljivi tubing opremljen hibridnom tehnologijom, površinsku opremu i poseban računalni program u upravljačkoj kabini (slika 5-1).



**Slika 5-1.** Savitljivi tubing opremljen hibridnom tehnologijom (Equion et al., 2020)

Operater unutar upravljačke kabine ima nadzor nad radnim parametrima uz pomoć kontrolne ploče i računalnog programa koji je prilagođen za primjenu ove hibridne tehnologije, te omogućava vizualizaciju i interpretaciju svih bušotinskih podataka koji su zabilježeni uz pomoć dubinske opreme. Specijalizirana kontrolna ploča omogućuje neprekidno napajanje dubinskih alatki s površine. Dodatna oprema može se spojiti u upravljačkoj kabini za pretvaranje i vizualiziranje više podataka dobivenih iz bušotine. Na primjer, tijekom korištenja bušotinske kamere koriste se dodatni kontrolni paneli koji omogućuju vizualizaciju videozapisa prikupljenih u bušotini i koji su preneseni preko optičkog kabela. Površinska oprema uključuje sklop koji omogućava kontinuirano protiskivanje fluida kroz niz savitljivog tubinga unutar kojeg je izolirani hibridni kabel. Jedinstveni kompaktni hibridni klizni prsten omogućava pravilnu komunikaciju kroz višestruka vlakna unutar optičkog kabela, te žičanom telemetrijom

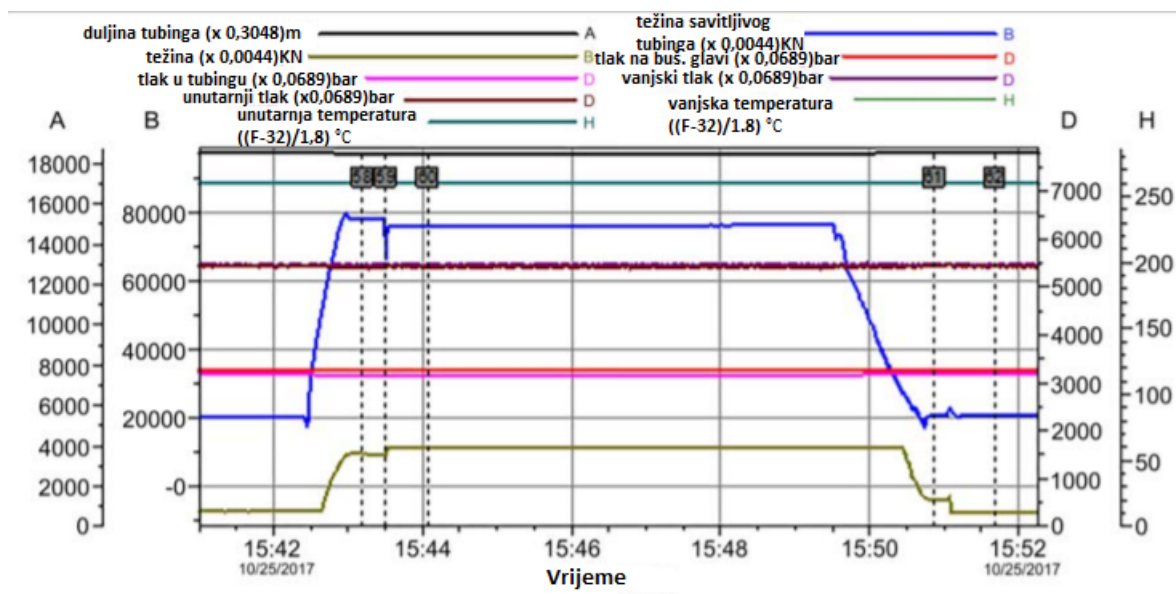
i napajanjem kroz savitljivi tubing, s dubinskim sklopom bez zaustavljanja ili utjecaja na operaciju koja se izvodi. U ovom slučaju zaštićeni hibridni kabal vanjskog promjer 4 mm sastavljen je od optičkih vlakana i jednog električnog vodiča. Ovaj hibridni kabel kompatibilan je s opremom koja se koristi pri operacijama sa savitljivim tubingom na moru i u odobalju, jer njegova težina ne utječe na težinu savitljivog tubinga. Ovaj hibridni sustav je otporan i na koroziju i abraziju, pa omogućava da se bilo koja vrsta tekućine crikulira kroz prstenasti prostor između savitljivog tubinga i kabela pri visokim brzinama i tlakovima. Tehnologija hibridnog savitljivog alata sastoji se od kompaktne dubinske opreme koja se sastoji od niza sljedećeg alata: glave kabla koja uključuje rezač kabla, motornog sklopa koji se sastoji od diska, dvostrukog zaklopnog ventila i hidrauličkog odvajača, modulnog senzora za karotažno mjerenje gama zrakama, ubrzivača, inklinatora, uređaja za orijentaciju alata i uređaja za kompenzaciju vibracija. U tablici 5-1. prikazane su specifikacije dva savitljiva tubinga s različitim unutarnjim promjerima koji su opremljeni hibridnom tehnologijom.

**Tablica 5-1.** Specifikacije dubinskog modula u sklopu opreme hibridne tehnologije savitljivog tubinga (Equion et al., 2020)

Unutarnji promjer(cm)	Protok fluida		Vlačna čvrstoća(KN)	Dozvoljeni torzijski moment(Nm)	Dozvoljeni tlak u bušotini(bar)	Dozvoljena temperatura u bušotini(°C)	Duljina(m)
	Protok fluida za ispiranje (m3/s)	Protok fluida za zaštitu od abrazije (m3/s)					
5,72	0.01	0.0026	200.17	1084.86	1034	176.67	3.81
8.57	0.02	0.0095	266.89	3796.29	1034	176.67	4.02
<u>DTS/DAS</u> Uključen	<u>Senzori</u> CCL,BHPI,BHPe,BHTi, BHTe,težina,torzija,gama zračenje, nagib,faza alata,vibracija		<u>Sustav alata na žici</u> Kompatibilan	<u>Konvencionalni sastav alata</u> Kompatibilan	<u>Izvor napajanja</u> Površinske baterije		

Prethodno navedeni dubinski modul u sklopu opreme hibridne tehnologije savitljivog tubinga ima mogućnost mjerenja, prikupljanja i bilježenja podataka iz bušotina s temperaturom do 176,67 °C i tlakom do 1034 bara. Prva upotreba ove hibridne tehnologije omogućila je operateru podatke o silama koje se javljaju tijekom zahtjevne operacije instrumentiranja, tijekom koje je

izvedeno više manevara korištenjem konvencionalnog savitljivog tubinga, a čiji je rezultat bio "prividno kretanje" alatki koje se instrumentiralo. Na slici 5-2. prikazan je primjer korištenja modula težine tijekom prijenosa sile na alatku koja se instrumentira.



**Slika 5-2.** Grafički prikaz korištenja modula težine pri prijenosu sile na alatku koja se instrumentira (Equion et al., 2020)

Korištenjem spomenute hibridne tehnologije utvrđeno je da se alat za instrumentiranje nalazi u istom položaju, a kretanje uočeno kod primjene konvencionalnog savitljivog tubinga povezano je s nekontroliranim faktorima, poput produljenja savitljivog tubinga. Hibridna tehnologija omogućava operateru da pravilno odabere sklop dubinskih alatki za izvođenje pojedine operacije, te da se smanji broj nepotrebnih manevara. Osim toga moguće je dobivanje podataka u stvarnom vremenu i usporedba istih s podacima koji su dobiveni primjenom računalnog programa za simulaciju. Također, primjena hibridne tehnologije savitljivog tubinga i hibridnog kabela omogućuje nadziranje kemijskih obrada u stvarnom vremenu, definiranje mjesta za postavljanje pakera i praćenje tlaka prilikom utiskivanja fluida. Ova hibridna tehnologija ima mogućnost praćenja radnog stanja pakera i omogućuje provjeru položaja kuglice u njenom sjedištu. Informacije o stanju pakera i položaju kuglice ne bi bilo moguće dobiti da su dostupni samo površinski podaci. Korištenjem površinskih informacija, moguće je zaključiti da nešto nije u redu, ali podaci neće pružiti dovoljno informacija kako bi se izbjegle pretpostavke i pogrešni zaključci, što može dovesti do dodatnog neproduktivnog vremena.

Možda je najvažnija činjenica da se kemijska obrada i analiza rezultata mogu izvesti bez vremenskih ograničenja. Hibridna tehnologija također omogućava izvršavanje bilo koje vrste operacije u jednom zahvatu, bez ograničavanja primjene i uporabe mehaničkih alata. Na slici 5-3. prikazane su alatke u sastavu hibridne tehnologije savitljivog tubinga.



**Slika 5-3.** Sastav dubinskih alatki za primjenu na hibridnom sustavu koji uključuje savitljivi tubing i hibridni kabel (Equion et al., 2020)

Otvorena konstrukcija omogućuje povezivanje hibridnog sustava s bilo kojim alatom koji je potreban ovisno o operaciji koja se vrši u kanalu bušotine zamjenom priključka, povećavajući učinkovitost postrojenja tijekom zahvata u bušotini koje zahtijevaju nekoliko vrsta pojedinačnih operacija (slika 5-4).



**Slika 5-4.** Otvorena konstrukcija dubinskih alatki hibridne tehnologije savitljivog tubinga (Higuera et al., 2020)

Vizualizacijska kamera visoke rezolucije u boji može se koristiti s hibridnim tehnologijom koristeći optimiziranu izravnu vezu, uz zadržavanje mogućnosti povezivanja bilo kojeg elektroničkog i mehaničkog alata na ovaj dubinski sklop. Kamera pruža poboljšanu vizualizaciju i omogućava dijagnostiku, intervenciju i provjeru u jednom manevru. Na slici 5-



5. prikazane su fotografije snimljene tijekom mjerenja proizvodnih parametara na kojima su vidljiva različita oštećenja nastala abrazivnim djelovanjem.



**Slika 5-5.** Snimke oštećenja nastalih abrazivnim djelovanjem (Equion et al., 2020)

Kamera visoke rezolucije omogućila je vizualizaciju oblika oštećenja, kao i dimenzioniranje otvora. Operacije koje uključuju primjenu hibridne tehnologije i dalje se razvijaju u svijetu kako bi osiguralo izvođenje fleksibilnih intervencija u stvarnom vremenu uz maksimalnu preciznost i pouzdanost izvedbe (Higuera et al., 2020).

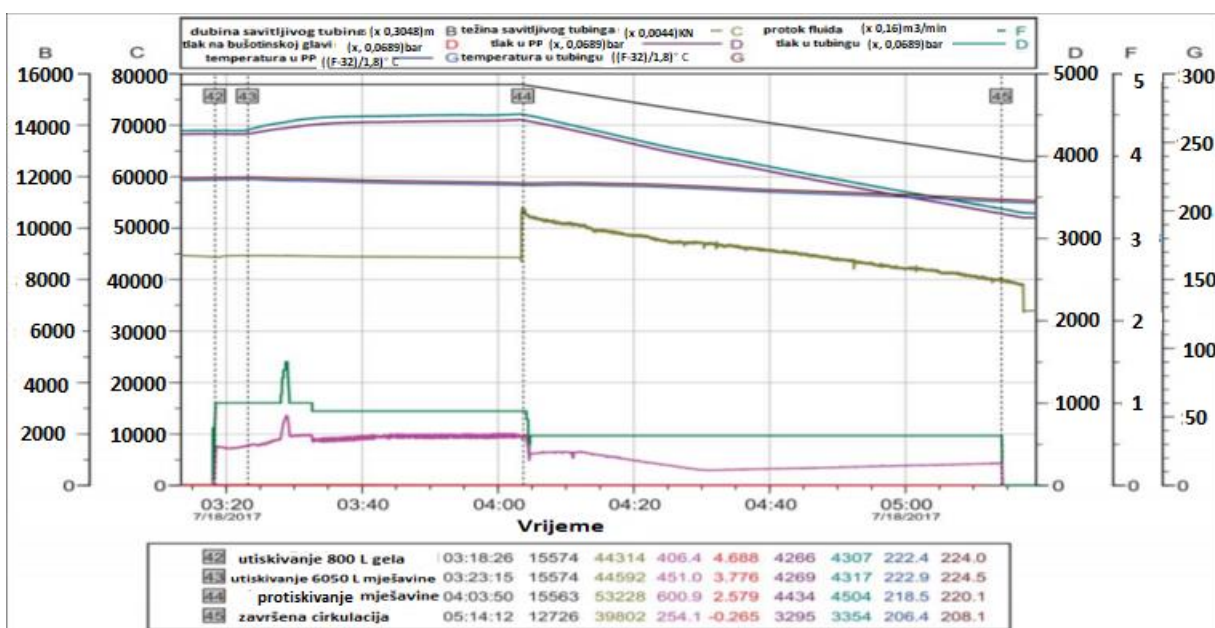
## **5.2. Izoliranje kanala bušotine pješčanim čepom uz pomoć savitljivog tubinga opremljenog integriranog sustavom optičkih vlakana**

Protiskivanje pijeska kroz savitljivi tubing s mogućnošću praćenja cijelog procesa u stvarnom vremenu nije uobičajena praksa zbog potencijalnih rizika povezanih s integritetom kabela unutar savitljivog tubinga. Uspješan postupak postavljanja pješčanog čepa primjenom tehnologije koja uključuje savitljivi tubing s integriranim sustavom optičkih vlakana bio je od velike važnosti tijekom postupka ponovnog opremanja kanala bušotine dvostrukim koncentričnim proizvodno-utisnim nizom u Kolumbiji (Sjedinjene Američke države), što je omogućilo optimizaciju vremena potrebnog za izvođenje ove operacije i troškova. Za izoliranje bušotine tijekom ponovnog remonta koristi se više metoda, a isplativa metoda za izoliranje može uključivati i postavljanje pješčanog čepa pomoću savitljivog tubinga i integriranog optičkog sustava za prikupljanje i prijenos podataka od dubinske opreme do površine u stvarnom vremenu. Podaci dobiveni u stvarnom vremenu od ključne su važnosti za postizanje preciznog taloženja pijeska, ne samo s obzirom na dubinu već i na količinu upumpanog pijeska. Bez ovog cjelovitog sustava, operator bi trebao izvršiti dodatna mjerenja kako bi uspostavio korelacije s električnim vodom što povećava trošak i vrijeme rada (Delgado et al., 2019a).

### 5.2.1. Izoliranje proizvodnog intervala uz pomoć savitljivog tubinga opremljenog sustavom optičkih vlakana za prijenos podataka u realnom vremenu

Ova tehnologija primijenjena je za izoliranje proizvodnog intervala uz pomoć pješčanog čepa proizvodnoj/utisnoj bušotini u istočnom dijelu Kolumbije u SAD-u. Bušotina je opremljena dvostrukim proizvodno/utisnim nizom cijevi koji omogućava proizvodnju nafte kroz unutarnji niz i utiskivanje plina kroz prstenasti prostor. Proizvodnja nafte iz bušotine bila je 290 m<sup>3</sup>/dan, a volumen utiskavanja plina 452 m<sup>3</sup>/dan s tlakom na bušotinskog glavi od 57 bar. Bušotina je izbušena i dovršena 2007. godine. Namjena operacije na ranije spomenutoj bušotini bila je da se izolira proizvodni interval koji je prekriven proizvodnim lajnerom. Nakon toga, unutarnji niz bi se mogao ukloniti i zamijeniti korištenjem remontnog postrojenja, čime bi se bušotina vratila proizvodnji. Za izoliranje proizvodnog intervala na razini proizvodnog lajnera nije se mogao koristiti paker na napuhavanje zbog prevelikog promjera, stoga je odabrana metoda korištenja pješčanog čepa na proizvodnom lajneru bez potrebe za vađenjem unutarnjeg niza. Dodatni razlog zbog čega se ne može koristiti paker na napuhavanje odnosi se na veličinu pakera koja ne bi jamčila da se može podržati očekivana proizvodnja i diferencijalni tlak u bušotini. Uz to, razmak između pakera i proizvodnog sloja je premali čime se povećava rizik prilikom izvlačenja pakera na površinu. Zbog tih razloga predloženo je korištenje pješčanog čepa na proizvodnom lajneru. Najbolja opcija za učinkovito izvođenje ove operacije bila je upotreba savitljivog tubinga u kombinaciji s optičkim kabelom za praćenje cijele operacije u stvarnom vremenu. Već nekoliko godina u praksi se koristi savitljivi tubinga s ugrađenim žičanim kabelom za prijenos podataka iz bušotine u stvarnom vremenu. Međutim, prilikom ove operacije potrebno je protisnuti 1900 kg pijeska kroz cijev pa žičani kabel unutar savitljivog tubinga nije prihvatljiv. Nova tehnologija optičkog sustava za prikupljanje i prijenos podataka u stvarnom vremenu u sastavu savitljivog tubinga prilikom izoliranja proizvodnog intervala uz pomoć pješčanog čepa pruža mogućnost prikupljati podatke o položaju pješčanog čepa, a istovremeno nudi mogućnost za doradu smjese koja se utiskuje ili neku drugu aktivnost koja je potrebna da bi operacija bila uspješna bez potrebe za vađenjem alata i smanjenjem ekonomičnosti operacije. Sastav alata koji se koristio za izoliranje proizvodnog intervala uz primjenu ove tehnologije sastoji se od: konektora savitljivog tubinga (spaja savitljivi tubinga sa krutim alatom), modularnog sustava

senzora (sklop vanjskih i unutarnjih manometara i termometara koji imaju mogućnost mjerenje tlak do 684 bar i podnose temperature do 177 °C), motornog sklopa (sklop koji se sastoji od protupovratnog ventila, hidrauličkog odspajaa, cirkulacijskog otvora) i mlaznice promjera 1,58 cm. Kabel s optičkim vlaknima s dvostrukim oblogom od 4,0 mm ugrađen je unutar savitljivog tubinga vanjskog promjera 4,45 cm (1 ¾”). Optički kabel se koristi za prijenos informacija s dubinskog alata u bušotini na površinu uz pomoć telemetrijskog sustava bez većeg utjecaja na radne parametre, poput protoka smjese koja se utiskuje. Ukupna dubina bušotine iznosi 4850 m, a postavljanje pješanog čepa bilo je planirano na dubini između 4626 m i 4780 m. Mješavina koja je utiskivana sastojala se od pijeska gustoće 1665 kg/m<sup>3</sup> i gela koji omogućuje održavanje pijeska u suspenziji i njegovo protiskivanje kroz sustav. Bušotina je ugušena primjenom slane otopine nakon čega je započeto utiskivanje materijala za postavljanje pješanog čepa. Volumen od 800 litara pješanog gela gustoće 4800 kg/m<sup>3</sup> bio je utisnut u bušotinu kako bi se osigurala stalna cirkulacija fluida. Sustav optičkih vlakana u sastavu savitljivog tubinga omogućio je identifikaciju stvarnog položaja pješanog čepa. Na slici 5-6 je prikazana prva faza postavljanja pješanog čepa za izoliranje proizvodnog intervala. Na slici je vidljivo kako je uz pomoć optičkog sustava moguće odrediti trenutni položaj pješanog čepa što omogućava redizajniranje sljedećih faza u procesu postavljanja pješanog čepa.



Slika 5-6. Prva faza postavljanja pješanog čepa (Delgado et al., 2019a)

Prema prethodno navedenoj slici može se uz pomoć optičkog sustava vidjeti trenutnu dubinu pješčanog čepa u odnosu na kanal bušotine koja iznosi 4762 metra i sve ostale parametre koji su bitni za izoliranje proizvodnog intervala pješčanim čepom. Na kraju cijele operacije, pješčani čep postavljen je u četiri faze. Nekontrolirani faktori mogu mijenjati položaj pješčanog čepa, ali dubinska korelacija u stvarnom vremenu omogućuje operatoru da dizajnira pješčani čep u stvarnom vremenu, čak i ako je došlo do pomaka položaja čepa pod utjecajem konfiguracije bušotine. Utisnuto je više od 3 tone pijeska, bez utjecaja na komunikaciju i integritet optičkih vlakana ugrađenih unutar niza savitljivog tubinga. Prethodno iskustvo postavljanja čepa uz pomoć savitljivog tubinga opremljenog kabelom s optičkim vlaknima na konkretno proizvodno/utisnoj bušotini u Istočnoj Kolumbiji može biti osnova za poboljšanje u budućim sličnim operacijama. Mogućnost postavljanja pješčanog čepa u jednom spuštanju smanjuje potrebu za dodatnom opremom na lokaciji i nepotrebne aktivnosti ili opremu za uklanjanje suvišnog pijeska ( Delgado et al., 2019a).

### **5.3. Primjena savitljivog tubinga opremljenog optičkim kabelom za ispitivanje proizvodnog potencijala ležišta**

Za izoliranje i ispitivanje svake dvostruke proizvodne zone konvencionalnim načinom potrebno je provesti nekoliko zasebnih aktivnosti što uključuje, spuštanje i postavljanje pakera, potom spuštanje mjernih instrumenata za prikupljanje podataka te nakon provođenje dodatnog manevra za vraćanje pakera iz bušotine. Ovaj postupak je ograničen s obzirom na informacije koje se mogu dobiti iz gornje ili donje zone u odnosu na položaj pakera. Jedina opcija je postavljanje dodatnog pakera kako bi se dobilo statičko mjerenje tlaka u formaciji. Prema tome, ako je svrha operacije mjerenje podataka na dvije odvojene formacije unutar istog kanala bušotine, potrebno je izvesti približno četiri spuštanja alata u kanal bušotine. Sastav alata koji uključuje ugrađeni sustav s optičkim vlaknima unutar savitljivog tubinga ima mogućnost praćenja parametara dviju različitih formacija koje su izolirane pakerom, a za to je potrebno samo jedno spuštanje alata u kanal bušotine. Postupak postavljanja pakera može se pratiti u stvarnom vremenu, izbjegavajući upotrebu očitavanja i upotrebu površinskih podataka. Sastav alata koji uključuje savitljivi tubing s povrativim pakerom i optički kabel može se koristiti za interpretaciju podataka dviju različitih formacija unutar iste bušotine. Podaci koje dobijemo u stvarnom vremenu služe kao osnova za daljnje operacije koje je potrebno izvršiti kako bi

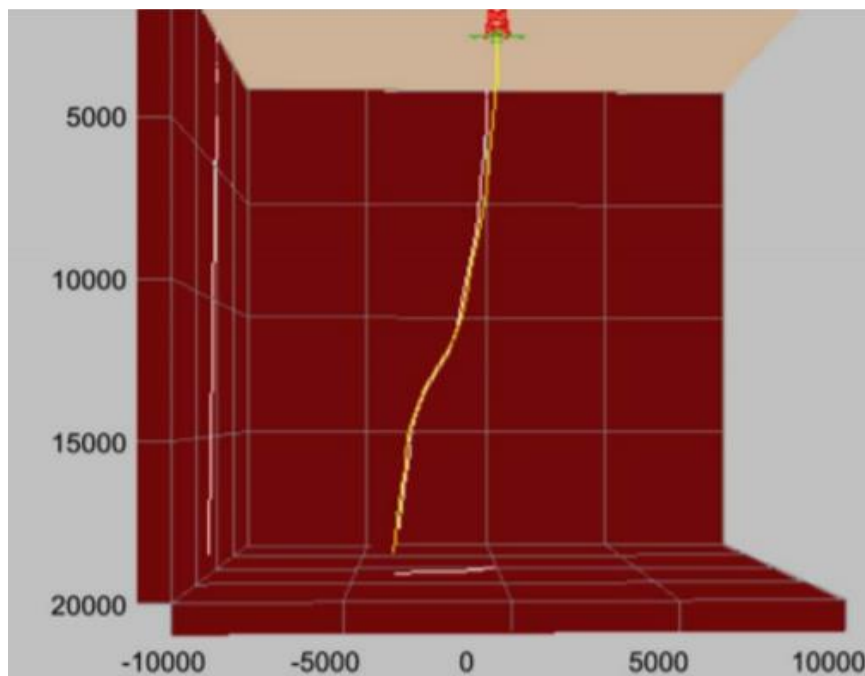
efikasnost proizvodnje ostala ista ili se po potrebi povećala. Uobičajeni sastav alata s pripadajućim funkcijama koji se koristi za ispitivanje dviju različitih formacija uz pomoć savitljivog tubinga opremljenog optičkim kabelom i povrativim pakerom prikazan je u tablici 5-2.

**Tablica 5-2.** Sastav alata s pripadajućim funkcijama koji služi za mjerenje podataka u stvarnom vremenu dviju različitih formacija u kanalu bušotine (Delgado et al., 2018b)

Sastav alata	Funkcija
Konektor savitljivog tubinga	Spaja savitljivi tubing s ostalim krutim alatom u kanalu bušotine.
Lokator zaštitnih cijevi	Modularni sustav sa vanjskim i unutarnjim sensorima temperature i tlaka koji služi za praćenje podataka u kanalu bušotine. Unutarnji senzor i vanjski senzori omogućuju praćenje podataka dviju različitih zona.
Hidraulički odspajač	Ima sposobnost odvajanja savitljivog tubinga od preostalog alata u slučaju opasnosti, aktivira se ubacivanjem kuglice ili regulacijom tlaka unutar tubinga.
Centralizer	Zaštićuje elemente pakera, sprječavajući kontakt s stijenkama kanala bušotine tijekom operacije spuštanja opreme.
Paker na napuhavanje	Omogućuje privremenu izolaciju zone bez potrebe izvlačenjem proizvodnih cijevi.

Savitljivi tubing opremljen optičkim kabelom moguće je primijeniti i u otklonjenim bušotinama. Primjer mjerenja trenutnih proizvodnih podataka različitih formacija izoliranih pakerom na napuhavanje unutar istog kanala bušotine primjenom ranije spomenutog sustava izvršeno je na bušotini Florena A5 u Istočnoj Kolumbiji, SAD. Bušotina Florena A5 ima završnu konstrukciju koja omogućava prolaz alata s maksimalnim vanjskim promjerom 8 cm (3,15”), a

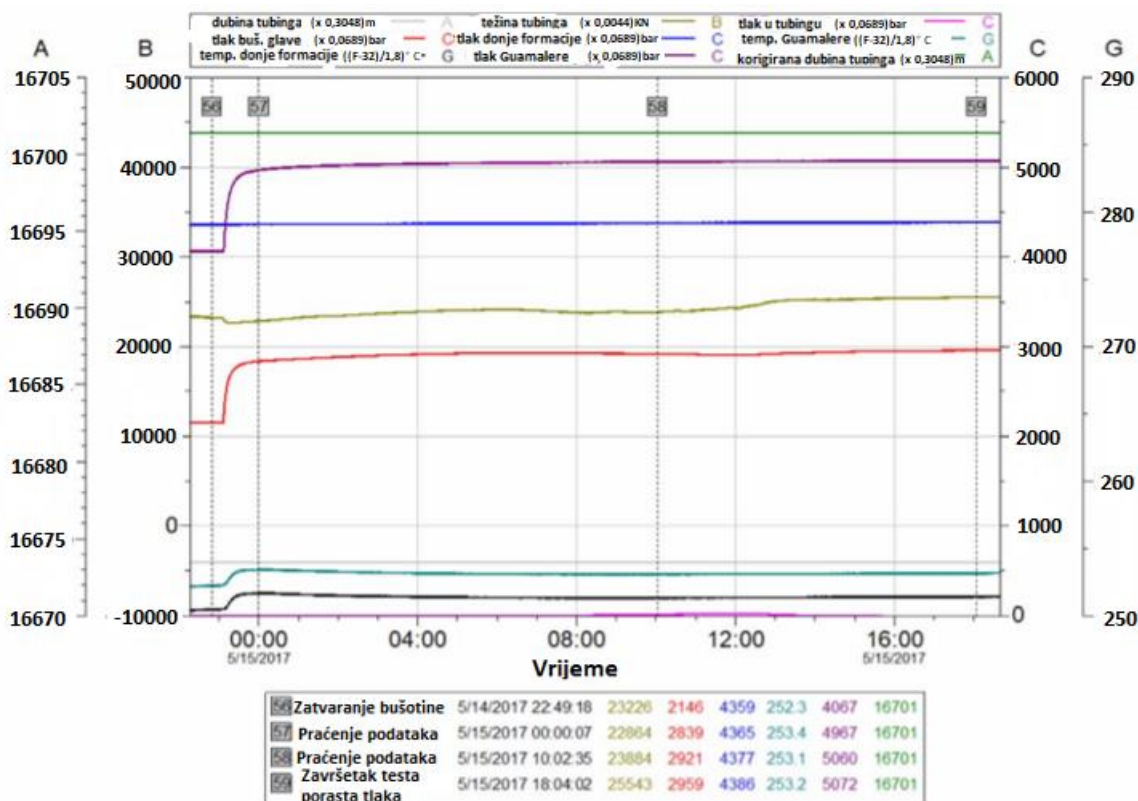
proizvodne zone nalaze se nasuprot ugrađenog proizvodnog lajnara vanjskog promjera 12,7 cm (5"). Mjerenja se izvode bez izvlačenja klasičnog proizvodnog niza iz bušotine. Na slici 5-7 je prikazan trodimenzionalni trajektorija bušotine Florena A5.



**Slika 5-7.** Trodimenzionalni prikaz bušotine Florena A5 (Delgado et al., 2018b)

Za obavljanje operacije nužno je da paker odgovara promjeru kanala bušotine i da izdrži najviši mogući diferencijalni tlak. Očekivani tlak u bušotini je 180 bara. Bušotina Florena A5 ima najveću proizvodnju iz formacija Guamalera, Mirador i Los Cuervos, koje karakteriziraju niska petrofizička svojstva. Nakon korekcije dubine, paker je postavljen na dubini od 5093 metara sa centriranim brtvama i ciljem da se izolira Guamalera formaciju i niže formacije za obavljanje testa porasta tlaka te da se kontrolira statički tlak za donju formaciju. Nakon spuštanja pakera na željenu dubinu, ubacuje se kuglica koja dosjeda u svoje sjedište na dnu pakera što osigurava porast tlaka unutar tubinga i pakera i napuhavanje brtvećih elemenata. Kada je paker aktiviran, bušotina se polako otvarala dok se tlak na razini formacije Guamalera smanjen sa 347 na 285 bar. Na taj način je uspostavljen protok uz istovremenu kontrolu dublje zaliježuće formacije, te je omogućeno prikupljanje informacija iz dvije zone istovremeno. Slika 5-8. na primjeru bušotine Florena A5 prikazuje istovremeno prikupljanje podatka za dvije različite

formacije nakon testa porasta tlaka i zatvaranja bušotine, koje se dobiju uz pomoć tehnologije optičkog kabela u sastavu savitljivog tubinga s ugrađenim pakerom.



**Slika 5-8.** Praćenje podataka dvije različite formacije unutar iste bušotine pomoću tehnologije savitljivog tubinga opremljenog s optičkim kabelom (Delgado et al., 2018b)

Prema prethodnoj slici može se uočiti da su konačni uvjeti nakon testa porasta tlaka za formaciju Guamalere bili sljedeći:

- tlak u tubingu prilikom zatvaranja bušotine: 204 bar;
- tlak prilikom zatvaranja bušotine pri dnu Gualamera formacije: 352 bar;
- temperatura prilikom zatvaranja bušotine na dnu Gualamera formacije: 122 ° C.

Istovremeni konačni uvjeti za donje formacije su bili sljedeći:

- tlak prilikom zatvaranja bušotine pri dnu donje formacije: 305 bar;
- temperatura prilikom zatvaranja bušotine na dnu donje formacije: 122 ° C.

Podaci prikupljeni unutarnjim senzorom u sklopu lokatora zaštitnih cijevi omogućili su određivanje tlaka donje formacije. Uz to, bilo je moguće provjeriti ispravnu izolaciju formacija. Podaci o gornjoj Guamalera formaciji koji su dobiveni vanjskim senzorom

analizirani su pomoću analize promjene tlaka. Nakon što je izvršen test porasta tlaka zabilježeno je povećanje proizvodnje od 73 m<sup>3</sup>/dan u odnosu na početnu proizvodnju. Zbog izvrsne ekonomičnosti i rezultata prilikom korištenja savitljivog tubinga opremljenog optičkim kabelom i pakerom za izoliranje formacija na bušotini „Florena A5“ ostvarene su višestruke efikasne operacije ovim novim pristupom prilikom primjene na veliki broj bušotina s više zona čiji su se podaci trebali izmjeriti prilikom jednog spuštanja alata u kanal bušotine (Delgado et al., 2018b).

#### **5.4. Preciznost perforiranja sustavom optičkih vlakana u stvarnom vremenu**

Loši rezultati perforiranja s uobičajenim alatom na žici rezultat su rizika povezanih s otklonom kanala bušotine, nosivošću žice, spuštanjem puške perforatora i sposobnosti postizanja optimalne ravnoteže za učinkovito čišćenje kanala bušotine. Zbog tih rizika, danas se za perforiranje u zakrivljenim bušotinama koristi savitljivi tubing s integriranim optičkim kabelom. Da bi se postigla odgovarajuća razlika slojnog tlaka i tlaka unutar kanala bušotine i točno odredila dubina intervala koji se perforira, optički kabel pruža najtočniji i najpouzdaniji postupak korelacije dubine, pored praćenja tlaka i temperature u stvarnom vremenu unutar savitljivog tubinga i prstenastog prostora. Korištenjem optičkog kabela, potrebna su samo dva spuštanja opreme za završetak postupka perforiranja u skladu s projektiranim zadatkom, umjesto da se izvode dodatna spuštanja potrebna za postizanje uvjeta podtlaka. Upotreba optičkog kabela može spriječiti pogreške u korelaciji koje nastaju kao posljedica produljenja savitljivog tubinga. Hidraulička puška može se upotrijebiti u kombinaciji s optičkim kabelom za aktiviranje puške perforatora bez utjecaja na integritet optičkih vlakana ili na senzore koji se koriste u procesu bušenja nakon detonacije. Prva upotreba ove tehnologije za perforiranje intervala na dubinama većim od 5791 m (19 000 ft) bila je na bušotinama na polju Istočne Kolumbije, SAD. Proizvodno polje u Istočnoj Kolumbiji obuhvaća najizazovnije bušotine u SAD-u sa dubinama od 5486 m (18 000 ft), visokim tlakovima i temperaturama, te razlikama u propusnosti između formacija. Ovo je prvi put u svijetu da se koristio hidraulički mehanizam za aktiviranje puške perforatora koja je spuštana na savitljivom tubingu opremljenim optičkim kabelom na dubinama većim od 5791 m (19 000 ft). Unutar savitljivog tubinga promjera 4,5 cm (1¾”) je ugrađen 4,0 mm dvostruki optički vlaknasti kabel. Vanjska zaštita kabela je legirana cijev, a unutarnja zaštita kabel je od nehrđajućeg čelika. Za prijenos informacija koristi se kabel s optičkim vlaknima pomoću telemetrijskog sustava bez ikakvog utjecaja na radne parametre

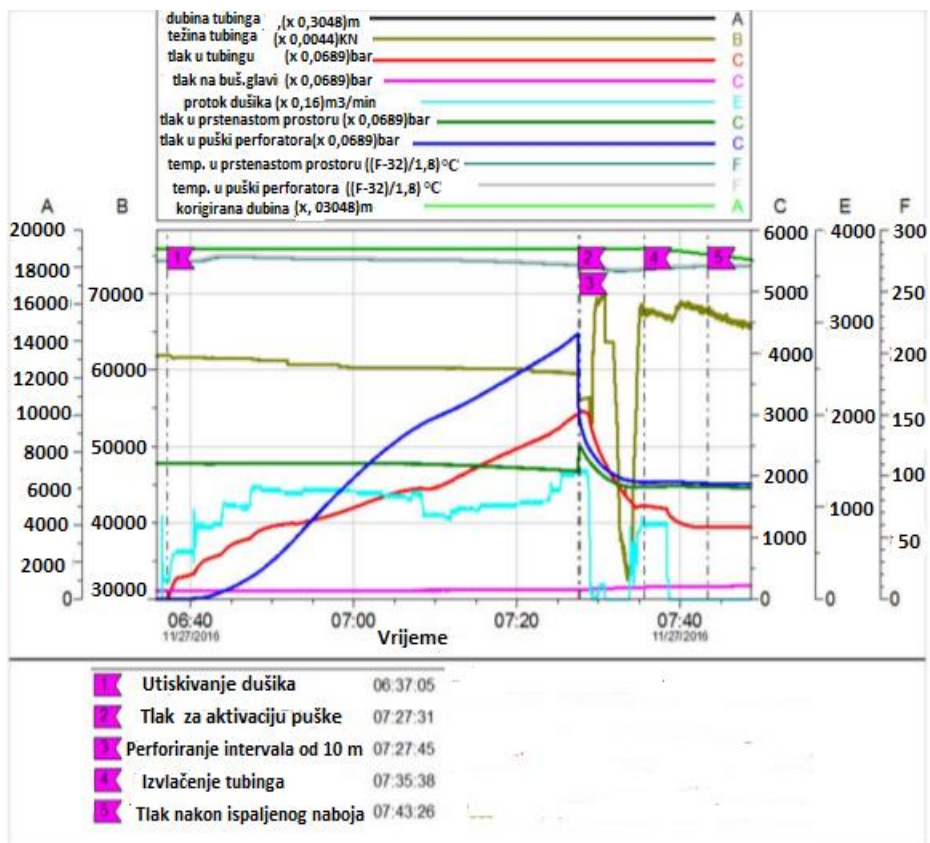


postrojenja i dubinske opreme. Sastavi alata koji su se koristili prilikom operacije perforiranja prikazani su na slici 5-9.

Sastav alata br. 1					Sastav alata br.2 i sastav alata br.3				
#	#	vanjski promjer cm	unutarnji promjer cm	duljina cm	#	#	vanjski promjer cm	unutarnji promjer cm	duljina cm
1	1	priključak savitljivog tubinga			1	1	priključak savitljivog tubinga		
		5.4	4.45	24.46			5.4	4.45	24.46
	2	sklop senzora				2	sklop senzora		
		5.4	1.67	347.5			5.4	1.67	347.5
3	3	sklop motora			3	3	sklop motora		
		5.4	1.5	66.3			5.4	1.5	66.3
4	4	rotirajući alat za ispiranje			4	4	sustav puške		
		5.4	2.54	30.5			7.78	5.3	1 115
ukupna duljina (cm)				468.6	ukupna duljina (cm)				1 554
max. vanjski promjer (cm)				5.4	max. vanjski promjer (cm)				7.78

**Slika 5-9.** Sastavi alata koji su se koristili tijekom perforiranja na dubini većoj od 5791m (Delgado et al., 2018a)

Prilikom operacije perforiranja koristile su se tri vrste sastava alata s obzirom na različite formacije za koje je perforiranje bilo predviđeno. Jedini način za aktiviranja puške za perforiranje kod savitljivog tubinga opremljenog optičkim kabelom je utiskivanjem dušika. Puška se aktivira kombinacijom primijenjenog hidrostatskog tlaka i tlaka u savitljivom tubingu. Sustav optičkih vlakana u sastavu savitljivog tubinga omogućuje praćenje tlaka i temperature, također od velike je važnosti što sustava optičkih vlakana omogućuje praćenje korigirane stvarne dubine na kojoj se nalaze puške za perforiranje s obzirom da može doći do krivih povratnih informacija uslijed produljenja niza savitljivog tubinga. Slika 5-10 prikazuje podatke o opremi savitljivog tubinga i kanalu bušotine u stvarnom vremenu, te prikazuje podatke o parametrima tijekom svakog zasebnog perforiranja pojedinog intervala.



**Slika 5-10.** Promjena praćenih parametara u stvarnom vremenu tijekom perforiranja novog intervala (Delgado et al., 2018a)

Nakon spuštanja prvog sastava alata s puškom za perforiranje na željenu dubinu povećava se tlak utiskivanjem dušika u savitljivi tubing do detonacijskog tlaka. Nakon što je detonacija puške potvrđena u otvorima na sensorima u sklopu optičkog sustava, savitljivi tubing je zadignut na sigurnu dubinu za praćenje odaziva bušotine. Tijekom prvog spuštanja uočeno je da temperatura na dnu bušotine iznosi 135 °C, a ne očekivanih 143 °C. Nakon sakupljanja podataka u stvarnom vremenu, savitljivi tubing sastava alata br. 1 je izvučen na površinu kako bi se sklopio sastav alata br. 2. Nakon točnog određivanja dubine, prvi metak puške postavljen je na ciljanu dubinu i perforiranje je izvedeno pomoću tlaka. Treće spuštanje slijedilo je isti postupak kao i za drugo spuštanje, te je izvedeno s podtlakom od 275 bar (4000 psi). Kao rezultat pouzdanosti i točnosti opisane tehnologije, naručitelj radova je mogao izvesti 16 dodatnih perforiranja koja su rezultirala povećanjem proizvodnje. Integrirani sustav optičkog kabela pruža preciznost i pouzdanost korelacije dubine, izbjegavajući korelacijske pogreške uzrokovane produljenjem savitljivog tubinga. Za korelaciju dubine koristi se hidraulička glava

na savitljivom tubingom koja omogućuje korištenje optičkog kabela za prijenos podataka, a ti podaci su osnova za definiranje parametara detoniranja puške s visokim stupnjem efikasnosti za tlakove na dubinama većim od 5791 m (19 000 ft). Ova konfiguracija omogućuje korelaciju s željenim dubinama i detonaciju puške koju treba nadzirati bez utjecaja na integritet vlakana i senzora. Podaci praćenja u stvarnom vremenu pomogli su operateru da donosi odluke u stvarnom vremenu (Delgado et al., 2018a).

### **5.5. Hibridna tehnologija savitljivog tubinga (kombinacija sustava optičkih vlakana i električnog kabela)**

Optički kabel u sastavu savitljivog tubinga pruža preciznost tijekom rada uz pomoć stvarnih mjerenja koja se provode na razini donjeg dijela alata u kanalu bušotine. Danas tehnologija optičkih vlakana unutar savitljivog tubinga označava važnu prekretnicu i osnovu nove ere s razvojem hibridne usluge savitljivog tubinga koja integrira optičku i električnu komunikaciju i snagu. Ovo podpoglavlje govori o učinkovitoj operaciji glodanja te o prikupljanju podataka uz pomoć optičkih vlakana u stvarnom vremenu. Potencijalni rizici koji su obično povezani s operacijama glodanja su sljedeći:

- oštećenja savitljivog tubinga se pripisuju zamoru materijala u ekstremnim uvjetima i / ili premašenju momenta torzije kao posljedica prijenosa rotacijske sile motora;
- preuranjena oštećenja na komponentama motora koja nastaju usljed prijelaza graničnih mogućnosti zakretnog momenta motora;
- zastoj motora koji može uzrokovati zaglavu alata ili se može krivo protumačiti kao izlazni zakretni moment motora (Delgado et al., 2019b).

Ovi su rizici bili idealni za potvrđivanje točnosti i pouzdanosti ove nove tehnologije gdje je zbog postojanja bušotinskih senzora (senzori zakretnog momenta, opterećenja, i diferencijalnog tlaka), bilo moguće nadzirati proces glodanja u stvarnom vremenu, čak i kada je bilo otkrivenih odstupanja ovih radnih parametara na površini. Integrirani sustav s optičkim vlaknima omogućuje učinkovito i pouzdano izvođenje operacije glodanja sa savitljivim tubingom uz praćenje cijelog procesa u stvarnom vremenu. Nova generacija hibridnih usluga savitljivog tubinga uklanja ograničenja s obzirom na snagu i dizajnirana je tako da bude kompatibilana sa

svim električnim i mehaničkim alatima, te da pruža mogućnost ostvarivanja nekoliko različitih intervencija prilikom jednog spuštanja alata u kanal bušotine. Ova nova tehnologija uključuje i robustan alat koji sadržava više senzora koji pomažu u razvoju više vrsta intervencija, povećavajući uvid trenutnog stanja kanala bušotine. Sastav alata koji se koristi prilikom operacije glodanja uz pomoć ove tehnologije je sljedeći: priključak savitljivog tubinga, sustav senzora (lokator zaštitnih cijevi, rezač kabla, uređaj za karotažu gama zrakama, unutarnji i vanjski senzori tlaka i temperature), hidraulički prekidač, cirkulacijski otvori (omogućuju cirkulaciju kroz bočne otvore alata), motorni sklop i konusni glodač (uklanja prepreke u kanalu bušotine). Jedna od prvih operacija glodanja uz primjenu savitljivog tubinga opremljenog optičkim kabelom bila je u usmjerenoj naftnoj bušotini na polju Istočne Kolumbije u SAD-u. Cilj operacije bio je povećati proizvodnju dodavajući perforacije, stoga je za osiguranje pristupa kanalu bušotine predložen postupak glodanja sa savitljivim tubingom. Zbog izazovnog okruženja, robustan alat koji sadrži senzore potrebne za ovu vrstu operacija, kao što su težina na dljetu, zakretni moment i diferencijalni tlak kroz dljetu, bio je potreban kako bi se osigurala pravovremena i sigurna reakcija na bilo kakvu promjenu. Dodatno, zbog nove generacije hibridnih kablova bilo je moguće prikupljati i prenositi podatke u stvarnome vremenu i napajati alat bez ograničenja vremena i snage. Kapsulirani hibridni kabel od 4,0 mm sastoji se od optičkih vlakana i jednog električnog vodiča. Ovaj neinvazivni kapsulirani kabel omogućio je da sustav može biti kompatibilan s bilo kojom operacijom savitljivog tubinga na kopnu i na moru, jer njegova težina ne utječe na ukupnu težinu cijevi, ima otpornost na koroziju i abraziju, što omogućava cirkulaciju bilo koje vrste tekućine kroz savitljivi tubing pri velikim brzinama. Uz to, ovo je omogućilo da sustav bude otvorene konstrukcije, omogućavajući integriranje više žičanih sustava kao i bilo koji mehanički alat. Sastav dubinskog alata na savitljivom tubingom koji uključuje sklop senzora, motor i konusni glodač, pokrenut je u bušotini nakon što je izvršena korelacija dubine koja je provedena korištenjem lokatora zaštitnih cijevi i gama zraka, kao što je prikazano na slici 5-11. Podaci dobiveni u stvarnom vremenu mogu biti usklađeni s datotekama od operatora zahvaljujući računalnom programu koji uspoređuje točne korelacije između sklopa senzora u stvarnom vremenu i senzora iz baze podataka. Uz pomoću primjera bušotine na naftnom polju Istočne Kolumbije (SAD) može se vidjeti da crvena krivulja prikazuje podatke koji su dobiveni pomoću hibridne tehnologije savitljivog tubinga, a crna

krivulja pokazuje podatke od strane operatora iz baze podataka za razmatranu bušotinu (Delgado et al., 2019b).



**Slika 5-11.** Korelacija dubine uz pomoć lokatora zaštitnih cijevi i gama zraka (Delgado et al., 2019b)

Jednom kada je korelacija izvedena, otkriveno je ograničenje na dubini od 5072 m (16,643 ft) gdje je zabilježen gubitak težine i porast vrijednosti zakretnog momenta. Postavljenim parametrima cirkulacije, započeo je postupak glodanja. U početku je primijećeno nekoliko porasta vrijednosti zakretnog momenta; međutim, savitljivi tubing je postavljen do dubine 5076 m te se na toj dubini vrijednost diferencijalnog tlaka i vrijednost zakretnog momenta u bušotini povećala. Značajna varijacija površinskih varijabli nije primijećena. Na kraju je bilo potrebno samo glodanje od 5072 m (16643 ft) do 5087 m (16691 ft). Provjerena je prolaznost u ovom intervalu te je dosegnuta konačna dubina bušotine. Zahvaljujući kontroli dubine u stvarnom vremenu, bilo je moguće utvrditi stvarni napredak za vrijeme operacije glodanja. Hibridna tehnologija glodanja uz pomoć niza savitljivog tubinga zahtjeva samo dva sata za analizu podataka tijekom intervencije glodanja intervala visine 15 m (50 ft) ako se podaci koriste u stvarnome vremenu. To se uspoređuje s konvencionalnim operacijama u kojoj bi osam ili više

sati bilo potrebno za dodatne zahvate neophodne za postizanje istog cilja. Tijekom uobičajenog postupka glodanja, može doći do višestrukih prekida i zaglave alata. Takvi rizici mogu se umanjiti praćenjem podataka tijekom glodanja u stvarnom vremenu s više varijabli i neprekidnim napajanjem s površine uz pomoć električnog kabla u sklopu hibridnog optičkog kabela (Delgado et al., 2019b).

## 6. ZAKLJUČAK

Današnja primjena savitljivog tubinga ima izrazitu važnost u naftnoj industriji zbog širokog spektra operacija za koje se koristi, velike mobilnosti i mogućnosti istovremenog mjerenja i prijenosa podataka u stvarnom vremenu bez potrebe zatvaranja bušotine, ograničavanja protoka i izvlačenja kontinuiranog savitljivog tubinga iz kanala bušotine. Primjena optičkih kablova koja je započela 2015. godine omogućuje prijenos informacija iz kanala bušotine istovremeno s izvođenjem operacije opremanja i održavanja bušotine čime je uklonjena potreba za više radnih jedinica na lokaciji, a samim time je povećana ekonomska isplativost izvršenja radova. Imati podatke dostupne u stvarnom vremenu pomaže u stvaranju realnije slike trenutnog stanja u bušotini i svih povezanih proizvodnih problema bušotine. Dakle, podaci prikupljeni u stvarnom vremenu iz bušotine daju veću sigurnost za odabir odgovarajuće i ciljane aktivnosti za opremanje i održavanje bušotina. Hibridni kabel za prijenos podataka u stvarnom vremenu razvijen u posljednje 3 godine i predstavlja revolucionarnu promjenu u primjeni savitljivog tubinga koja uključuje sve prednosti prethodnih generacija optičkih vlakana za rješavanje problema bez ograničenja napajanja. S obzirom na široku primjenu optičkih kablova na terenu Istočne Kolumbije i SAD-a može se zaključiti da je došlo do povećanja proizvodnje iz ranije spomenutih bušotina, a vrijeme potrebno za izvršenje operacije u bušotini je uveliko smanjeno. Pretpostavlja se da će primjena optičkih kabela u operacijama opremanja i održavanja bušotina u budućnosti izrazito rasti usporedno s već vidljivim rastom primjene postrojenja za rad sa savitljivim tubingom. Ukoliko cijene nafte i plina budu na profitabilnoj razini i ako dopuste da bi se uopće moglo ulagati u dodatni razvitak primjene optičkih kablova, to će rezultirati dodatnim povećanjem efikasnosti radnih karakteristika postrojenja za rad sa savitljivim tubingom.

## 7. POPIS LITERATURE

1. CTES, 2005. Coiled Tubing Manual, Conroe, Texas 77303
2. DELGADO E., HIGUERA J., PACHECO C., TORRES C., TORRES M., VERA V., 2019a. Real-Time Fiber-Optic Integrated System Allows Precision in a Surgical Sand Plug Settlement of a Temporary Well Isolation Operation, SPE-194278-MS, SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition held in The Woodlands, USA, 26-27 March 2019
3. DELGADO E., PACHECO C., TORRES C., VERA V., 2018b. Real-Time Fiber-Optic Integrated System with Retrievable Packer Enables Single-Trip Dual-Zone Evaluation: Case Study, Eastern Foothills, Colombia, SPE-191879-MS, SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference, Brisbane, Australia 23-25 October 2018.
4. DELGADO E., HIGUERA J., PACHECO C., SAMPAYO D., TORRES C., VERA V., 2018a. Real-Time Fiber Optic Integrated System Provides Precision and Confidence in a Coiled-Tubing-Conveyed Perforating Operation: A Case Study from the Eastern Foothills in Colombia, SPE-189957-MS, SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference, The Woodlands, USA, 27-28 March 2018.
5. DELGADO E., HIGUERA J., LOZANO R., PACHECO C., SAMPAYO D., TORRES C., VERA V., 2019b. Industry-First Hybrid Technology for Coiled Tubing Services Combining Fiber-Optic and Electric Line, Enabling Downhole Power and Real-Time Communication for the Next-Generation Decision-Making Process with Wider Downhole Insight, SPE-197177-MS, Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference held in Abu Dhabi, UAE, 11-14 November 2019
6. FOWLER S.H., HILTS R.L., 1993. Fishing With Coiled Tubing, SPE 25499, Production Operations Symposium, Oklahoma City, U.S.A., March 21-23, 1993.
7. EQUION, HALIBURTON, HIGUERA J., TORRES C., VERA V., 2020. Real-Time Hybrid Coiled Tubing Technology: A Review of Challenges and Opportunities in Field Operations, SPE-199840-MS, SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition held in The Woodlands, The Woodlands, USA, 24-25 March 2020.



8. MATANOVIĆ, D., MOSLAVAC, B., 2011. Opremanje i održavanje bušotina, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb
9. PAŠIĆ, B., 2018., Postrojenje za rad sa savitljivim tubingom, Powerpoint prezentacije s kolegija Opremanje i održavanje bušotina 1, održanog u ak. god. 2017/2018 na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, Sveučilište u Zagrebu
10. SCHLUMBERGER DOWELL, 1995. Coiled Tubing Client School Manual, str. 2-65.

## **INTERNET IZVORI**

11. CARDINAL SERVICES, 2020. Cardinal Coil Tubing,  
URL: <https://cardinalsvc.com/services-coil-tubing/> (11.05.2020.)
12. COIL SOLUTIONS, 2016. History of the coil tubing injector,  
URL: <http://www.coilsolutions.com/about-us/news/history-of-the-coil-tubing-injector/>  
(06.05.2020.)
13. CONSOLIDATE RIG WORKS, 2020. Power Packs,  
URL: <http://crlp.com/products/power-packs/> (11.05.2020.)
14. D-DAY REVISITED, 2012. Operation Pluto,  
URL: <https://d-dayrevisited.co.uk/d-day-history/planning-and-preparation/operation-pluto/>  
(06.05.2020.)
15. DRILLING CONTRACTOR, 2009. Two-in-one rotary drilling/coiled-tubing rig enhances performance for Permian Basin wells,  
URL: <https://www.drillingcontractor.org/two-in-one-rotary-drilling-coiled-tubing-rig-enhances-performance-for-permian-basin-wells-1811> (12.05.2020.)
16. DRILLING FORMULAS.COM, 2016. Coiled Tubing Equipment Overview,  
URL: <http://www.drillingformulas.com/coiled-tubing-equipment-overview/> (10.05.2020)
17. DWELLOP, 2018a. Coiled Tubing Jacking Frames,

URL:<https://www.spooltech.com/wp-content/uploads/2018/08/4435-A4-Coiled-Tubing-Jacking-Frames.pdf> (12.05.2020.)

18. DWELLOP, 2018b. Jacking Frame,

URL: <https://www.dwellop.no/well-intervention-systems/jacking-frame> (12.05.2020.)

19. EXWELL OILFIELD, 2012. Exwell Tandem Side Door Stripper,

URL:[https://exwelloilfield.com/ps\\_pressurecontrol/coil/pcc\\_tandamstripper.html](https://exwelloilfield.com/ps_pressurecontrol/coil/pcc_tandamstripper.html)  
(13.05.2020.)

20. FORUM ENERGY TECHNOLOGIES, 2017. Global Tubing Launches New Coiled Tubing Product,

URL:<https://www.f-e-t.com/global-tubing-news/global-tubing-launches-new-coiled-tubing-product/> (09.05.2020)

21. GEOPHYSICS SKETCH NOTE, 2018. Logging and Perforating with Coiled Tubing,

URL:<http://www.geosketchnote.net/2018/12/logging-and-perforating-with-coiled.html>  
(18.05.2020.)

22. GRIFCO, 2020. Coiled Tubing Fishing Operation,

URL:<http://www.grifco-oiltools.com/services/coiledtubingfishingoperation1.htm>  
(17.05.2020.)

23. HARESTAD, 2019. Overflateutstyr til coiled tubing,

URL:<https://ndla.no/subjects/subject:6/topic:1:182061/topic:1:178765/resource:1:177988>  
(11.05.2020.)

24. ICOTA, 2019. CTU Rig Counts,

URL: <http://www.icota-canada.com/page-18107> (17.02.2020.)

25. INDIAMART, 2012a. Electro galvanized coil,

URL:<https://www.indiamart.com/proddetail/electro-galvanized-coil-20218117597.html>  
(07.05.2020.)

26. INDIAMART, 2011b. Conventional Coil Tubing Stripper Packer,  
URL:<https://www.indiamart.com/proddetail/conventional-coil-tubing-stripper-packer-3029673588.html> (13.05.2020.)
27. MANUFACTURING BEST PRACTICES, 2018. Global tubing,  
URL: <https://www.bestmanufacturingpractices.com/2018/10/global-tubing/> (09.05.2020)
28. NATIONAL OILWELL VARCO, 2020. 24K Coiled Tubing Reel,  
URL: <https://www.nov.com/products/24k-coiled-tubing-reel> (14.05.2020.)
29. NORFLEET, 2015. Well Drilling Lesson 37 Coiled Tubing,  
URL: <https://slideplayer.com/slide/3933513/> (13.05.2020.)
30. OILFIELD TEAM, 2019. Coiled Tubing Unit Equipment Design,  
URL:<https://oilfieldteam.com/en/a/learning/coiled-tubing-unit-equipment-design>  
(11.05.2020.)
31. OIL AND GAS ONLINE, 2020a. Coiled Tubing Side Door Stripper/Packer,  
URL:<https://www.oilandgasonline.com/doc/coiled-tubing-side-door-stripperpacker-0001>  
(13.05.2020.)
32. OIL AND GAS ONLINE, 2020b. Coiled Tubing Rotating Joint,  
URL: <https://www.oilandgasonline.com/doc/coiled-tubing-rotating-joint-0001> (13.05.2020.)
33. PETROSKILLS, 2018. What You Need to Know About Production Logging,  
URL: [https://www.petroskills.com/blog/entry/00\\_totm/june-18-sub-what-you-need-to-know-about-production-logging#.Xt-wBUUzZPZ](https://www.petroskills.com/blog/entry/00_totm/june-18-sub-what-you-need-to-know-about-production-logging#.Xt-wBUUzZPZ) (20.05.2020.)
34. PETROWIKI, 2015a. History of coiled tubing technology,  
URL: [https://petrowiki.org/History\\_of\\_coiled\\_tubing\\_technology](https://petrowiki.org/History_of_coiled_tubing_technology) (06.05.2020.)
35. PETROWIKI, 2015b. Coiled tubing,  
URL: [https://petrowiki.org/Coiled\\_tubing](https://petrowiki.org/Coiled_tubing) (08.05.2020.)

36. PETROWIKI, 2015c. Prime mover for CT unit,  
URL: [https://petrowiki.org/Prime\\_mover\\_for\\_CT\\_unit](https://petrowiki.org/Prime_mover_for_CT_unit) (11.05.2020.)
37. PETROWIKI, 2015d. Tubing injector for CT unit,  
URL: [https://petrowiki.org/Tubing\\_injector\\_for\\_CT\\_unit](https://petrowiki.org/Tubing_injector_for_CT_unit) (11.05.2020.)
38. PETROWIKI, 2015e. Well control stack for CT operations,  
URL: [https://petrowiki.org/Well\\_control\\_stack\\_for\\_CT\\_operations](https://petrowiki.org/Well_control_stack_for_CT_operations) (13.05.2020.)
39. PETROWIKI, 2015f. Coiled tubing applications,  
URL: [https://petrowiki.org/Coiled\\_tubing\\_applications](https://petrowiki.org/Coiled_tubing_applications) (16.05.2020.)
40. PETROWIKI, 2015g. Coiled tubing drilling,  
URL: [https://petrowiki.org/Coiled\\_tubing\\_drilling](https://petrowiki.org/Coiled_tubing_drilling) (17.05.2020.)
41. RUI TAI MECHANICAL & ELECTRICAL, 2013. Coiled Tubing Swivel,  
URL: <http://www.tjruitai.com/en/product/swivel-joints.html> (13.05.2020.)
42. SCHLUMBERGER, 2020a. Bias weld,  
URL: [https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/b/bias\\_weld.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/b/bias_weld.aspx) (07.05.2020.)
43. SCHLUMBERGER, 2020b. CT Perforating,  
URL: <https://www.slb.com/well-intervention/coiled-tubing-intervention/perforating>  
(18.05.2020.)
44. SCHLUMBERGER, 2016c. Oil & Gas 101,  
URL: [https://pesa.org/wp-content/uploads/2016/10/PESA-Oil-Gas\\_Well-Intervention.pdf](https://pesa.org/wp-content/uploads/2016/10/PESA-Oil-Gas_Well-Intervention.pdf)  
(20.05.2020.)
45. SMAPE, 2012. CT Control Cabin,  
URL: <http://www.italfluid-egypt.com/ct-control-cabin.aspx> (15.05.2020.)

46. STEELGURU, 2015. Steel Strips commissionees wide HRC slitting line at Dappar plant,

URL:<https://steelguru.com/steel/steel-strips-commissionees-wide-hrc-slitting-line-at-dappar-plant/442621> (07.05.2020.)

47. THE ANTECH BLOG, 2017. Applications For Coiled Tubing Drilling,

URL: <https://www.antech.co.uk/applications-for-coiled-tubing-drilling.html> (17.05.2020.)

48. WEBCO INDUSTRIES, 2018. Coiled Tubing,

URL:[https://www.webcotube.com/sites/default/files/BasicContent\\_Coiled\\_0.jpg](https://www.webcotube.com/sites/default/files/BasicContent_Coiled_0.jpg) (18.05.2020.)

49. WORLD OIL, 2016. NOV's Quality Tubing produces record-setting tubing string,

URL:<https://www.worldoil.com/news/2016/10/12/novs-quality-tubing-produces-record-setting-tubing-string> (09.05.2020.)

*IZJAVA*

*Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad pod naslovom „Primjena optičkih kablova u izvođenju radova na održavanju bušotina upotrebom postrojenja za rad sa savitljivim tubingom" izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.*

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'L. Grgić', is written over a horizontal line.

*Lovro Grgić*



KLASA: 602-04/20-01/259  
URBROJ: 251-70-03-20-2  
U Zagrebu, 03.12.2020.

**Lovro Grgić, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/20-01/259, UR. BROJ: 251-70-12-20-1 od 01.12.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

### PRIMJENA OPTIČKIH KABLOVA U IZVOĐENJU RADOVA NA ODRŽAVANJU BUŠOTINA UPOTREBOM POSTROJENJA ZA RAD SA SAVITLJIVIM TUBINGOM

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu doc. dr. sc. Borivoje Pašić, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

**Voditelj**

(potpis)

Doc. dr. sc. Borivoje Pašić

(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

**Prodekan za nastavu i  
studente**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)