

Bočne bušotine malog promjera

Semren, Mirko

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:000127>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-24**



Repository / Repozitorij:

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



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

BOČNE BUŠOTINE MALOG PROMJERA
Diplomski rad

Mirko Semren
N-233

Zagreb, 2018.

BOČNE BUŠOTINE MALOG PROMJERA

MIRKO SEMREN

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

Sažetak

Tehnologija izrade bočnih (*engl. re-entry*) bušotina i tehnologija izrade bušotina malog promjera (*engl. slim hole wells*) svoja prva pojavljivanja u naftnoj industriji zabilježile su otprilike u isto vrijeme, sredinom prošloga stoljeća, međutim niti jedna od tehnologija nije značajnije ušla u bušaću praksu sve do početka 1990-ih godina, kada se došlo do spoznaje o mogućim uštedama koje omogućuju izrade takvih bušotina.

U nastavku ovoga rada bit će predstavljen kratki povijesni razvoj, prednosti i nedostaci te načini izrade bušotina malog promjera i bočnih bušotina. Isto tako detaljnije će se obraditi primjena savitljivog tubinga u svrhe bušenja jer se primjenom te tehnologije omogućava izrada bočnih bušotina malog promjera. Također su navedeni primjeri izrade bušotina malog promjera korištenjem savitljivog tubinga, te primjer izrade bočne bušotine malog promjera u Hrvatskoj korištenjem konvencionalnog sklopa alatki.

Ključne riječi: bočne bušotine malog promjera, bočne bušotine, re-entry, bušotine malog promjera, slim hole bušotine, savitljivi tubing, Molve 35-R.

Diplomski rad sadrži: 53 stranice, 5 tablica, 24 slike i 27 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

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

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

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

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

Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a

Datum obrane: 16. veljače 2018., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

SLIM HOLE RE-ENTRY WELLS

MIRKO SEMREN

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

Abstract

The re-entry borehole technology and the slim hole well technology appeared in the petroleum industry roughly at the same time, in the middle of the 20th century. However, none of the two were used to any great extent in well drilling until the beginning of the 1990s, when contractors discovered the potential for savings by using these technologies. This thesis briefly describes the historical development, advantages and disadvantages and methods of drilling slim hole and re-entry wells. Also, the application of coiled tubing for drilling purposes will be elaborated upon, since the utilisation of this technology has made the drilling slim hole re-entry wells possible. The thesis also contains examples of slim hole re-entry drilling using coiled tubing technology and conventional bottom-hole assembly in a well in Croatia.

Keywords: slim hole re-entry wells, re-entry technology, slim hole drilling, coiled tubing drilling

Thesis contains: 53 pages, 5 tables, 24 figures and 27 references

Original in: Croatian

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

Supervisor: Professor Zdenko Krištafor, PhD

Reviewers: Professor Zdenko Krištafor, PhD

Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD

Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

Date of defense: 16 February 2018, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. BUŠOTINE MALOG PROMJERA	3
2.1. Načini izrade bušotina malog promjera	4
2.1.1. Izrada bušotina malog promjera primjenom sklopova bušaćih alatki	4
2.1.1.1. Upravljivi sustav.....	5
2.1.1.2. Rotirajući upravljivi sustav.....	7
2.1.2. Izrada bušotina malog promjera primjenom savitljivog tubinga	9
3. BOČNE (RE-ENTRY) BUŠOTINE	10
3.1. Postupak izrade bočne bušotine	10
3.1.1. Načini izlaska iz postojećeg kanala bušotine.....	10
3.1.2. Načini izrade bočne bušotine	13
3.1.2.1. Alat za izradu bočne bušotine sklopom bušaćih alatki.....	14
3.1.2.2. Alat za izradu bočnih bušotina uz pomoć savitljivog tubinga.....	17
4. BUŠENJE UZ PRIMJENU SAVITLJIVOG TUBINGA	18
4.1. Postrojenje za rad sa savitljivim tubingom.....	23
4.2. Sklop alatki za bušenje uz primjenu savitljivog tubinga	25
4.3. Izrada bočnih bušotina malog promjera uz primjenu savitljivog tubinga.....	28
4.3.1. Primjer izrade bočne bušotine malog promjera uz korištenje savitljivog tubinga.....	29
4.3.2. Izrada bočnih bušotina malog promjera uz primjenu savitljivog tubinga i rib steering motor sklopa	33
4.3.2.1. Primjer korištenja RSM sklopa pri izradi bočnih bušotina malog promjera uz upotrebu savitljivog tubinga.....	36
5. PRIMJERI BOČNIH BUŠOTINA MALOG PROMJERA NA PLINSKOM POLJU MOLVE.....	38

5.1. Bušotina Molve-35	38
5.2. Bušotina Molve-35R	40
5.3. Nastavak bušenja na bušotini Mol-35R.....	44
6. ZAKLJUČAK.....	50
7. LITERATURA	51

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Primjer upravljivog sustava.....	5
Slika 2-2. Rotacijski i klizni način rada upravljivog sustava	7
Slika 2-3. Rotirajući upravljivi sustav	8
Slika 2-4. Prikaz aktivirane i neaktivne papuče rotirajućeg upravljivog sustava	8
Slika 3-1. Izrada bočnog kanala korištenjem klina i glodača.....	11
Slika 3-2. Izrada bočnog kanala uz primjenu cementnog mosta i glodača	12
Slika 3-3. Tipovi bočnih bušotina	14
Slika 3-4. Sklop bušačkih alatki korišten za izradu bušotina kratkog polumjera zakrivljenosti.....	15
Slika 3-5. Sklop bušačkih alatki korišten za izradu bušotina srednjeg polumjera zakrivljenosti	16
Slika 4-1. Bannisterov koncept savitljivog tubinga.....	18
Slika 4-2. Prototip injektorskog sklopa	19
Slika 4-3. Prikaza povećanja promjera savitljivog tubinga	20
Slika 4-4. Prikaz postrojenja za rad sa savitljivim tubingom	23
Slika 4-5. Sastav alata za bušenje vertikalnih bušotina uz primjenu savitljivog tubinga....	25
Slika 4-6. Sastav alata za bušenje koso usmjerenih i horizontalnih bušotina uz primjenu savitljivog tubinga.....	27
Slika 4-7. Prikaz bušotine MD-330 prije i nakon bušenja bočne bušotine malog promjera	31
Slika 4-8. Sastav RSM sklopa.....	34
Slika 4-9. Stvarni i shematski prikaz rebara RSM sklopa	35
Slika 5-1. Strukturna karta po krovini ležišta Molve	39
Slika 5-2. Klin za skretanje i niz tri glodača za otvaranje prozora	40
Slika 5-3. Geološki profil bušotine Mol-35 i projektirani profil bušotine Mol-35R.....	41
Slika 5-4. Stanje bušotine Mol-35R nakon napuštanja	43
Slika 5-5. Jednožrvanjsko dlijeto promjera 95,25 mm (3 ¾") korišteno za bušenje otvorenog kanala	45
Slika 5-6. Prikaz konačnog izgleda bušotine Mol-35R	46

POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Prikaz kanadskih bušotina izrađenih uz primjenu savitljivog tubinga u periodu 1974. – 1994.	28
Tablica 5-1. Status bušotine Molve-35R nakon napuštanja	42
Tablica 5-2. Svojstva isplake korištene za izradu otvorenog dijela kanala bušotine (3 380 – 3 440 m)	47
Tablica 5-3. Dlijeta korištena za nastavak bušenja kanala bušotine Mol-35R.....	48
Tablica 5-4. Sastav krutog alata korištenog za nastavak bušenja kanala bušotine Mol-35R.....	49

1. UVOD

Odavno je poznato da kretanja u naftnoj industriji ovise o cijeni nafte na svjetskom tržištu. Što je cijena nafte veća, više će se bušotina izrađivati i više će se novca ulagati u razvoj novih tehnologija koje će omogućiti jeftiniju izradu bušotina, a naftnim kompanijama omogućiti ostvarivanje velikih zarada. Naftna industrija u stalnoj je potrazi za tehnološkim dostignućima koja će omogućiti bržu i efikasniju izradu kanala bušotina. Mnoge naftne kompanije također ulažu velike napore kako bi ostvarile maksimalan iscrpak sa starih polja, drugim riječima ulažu se velika sredstva u razvoj tehnologija koje će povećati proizvodnju starih polja i bušotina.

Sredinom 1980-ih godina u naftnu industriju uvedena je izrada horizontalnih bušotina. Iako se u počecima smatralo kako tehnologija izrade horizontalnih bušotina neće opstati u naftnoj industriji, danas, nakon više od 30 godina korištenja može se reći da je ta tehnologija jedno od najznačajnijih otkrića u povijesti naftne industrije. Iako je cijena izrade horizontalne bušotine i dalje puno veća nego cijena izrade vertikalne bušotine, prednosti koje se ostvaruju izradom horizontalne bušotine, među kojima je najvažnije povećanje kontakta bušotine i ležišta što dovodi do povećanja proizvodnje, i dalje opravdavaju izradu tih bušotina. Primjena horizontalnih bušotina u svijetu svake je godine sve veća pa su se tako od početka primjene pa do danas nastojale razviti tehnologije koje bi smanjile cijenu izrade horizontalnih bušotina. Izradom bočnih (*engl. re-entry*) bušotina koje koriste dio već izrađenog kanala bušotine prije same izrade horizontalnog dijela te izradom bušotina malog promjera u kojima se smanjuje količina opreme koju je potrebno ugraditi u bušotinu, minimizira se količina otpada i omogućeno je korištenje manjih, istovremeno i jeftinijih postrojenja. Sve je to uvelike doprinijelo smanjenju troškova izrade horizontalnih bušotina.

Iako su tehnologija izrade bočnih (*engl. re-entry*) bušotina i tehnologija izrade bušotina malog promjera svoja prva pojavljivanja u naftnoj industriji zabilježile otprilike u isto vrijeme, sredinom prošloga stoljeća, niti jedna od tehnologija nije značajnije primjenjivana za izradu bušotina sve do početka 1990-ih godina, kada se došlo do spoznaje o mogućim uštedama koje omogućuju izrade takvih bušotina.

U nastavku ovoga rada bit će predstavljen kratki povijesni razvoj, prednosti i nedostaci te načini izrade bušotina malog promjera i bočnih bušotina. Isto tako detaljnije će se obraditi primjena savitljivog tubinga u svrhu bušenja jer se primjenom te tehnologije omogućava izrada bočnih bušotina malog promjera. Također su navedeni primjeri izrade bušotina malog

promjera korištenjem savitljivog tubinga, te primjer izrade bočne bušotine malog promjera u Hrvatskoj korištenjem konvencionalnog sklopa alatki.

2. BUŠOTINE MALOG PROMJERA

Kada se govori o bušotinama malog promjera (*engl. slim hole*) postoji nekoliko definicija toga pojma. Tako su prema definiciji iz Schlumbergerova rječnika bušotine malog promjera sve bušotine čiji promjer nije veći od 0,152 m tj. 6". Prema drugom izvoru, bušotinama malog promjera mogu se smatrati sve bušotine kod kojih minimalno 90% duljine kanala ima promjer manji od 0,178 m (7") ili koje imaju minimalno 70% duljine kanala promjera manjeg od 0,152 m (6") (Golub, 2005; Randolph et al., 1991), dok se pojam „slim-hole“ u englesko-hrvatskom enciklopedijskom rječniku istraživanja i proizvodnje nafte i plina definira kao bušotina promjera manjeg od 0,127 m odnosno 5" ili između 0,121 m i 0,171 m (4 ¾" - 6 ¾").

Bušotine malog promjera uvedene su u naftnu industriju 1950-ih godina kao financijski isplativa alternativa konvencionalnom bušenju. Tijekom 1960-ih i 1970-ih godina bušotine malog promjera nisu se često izrađivale, prvenstveno iz sigurnosnih razloga tj. zbog povećane mogućnosti dotoka i erupcije iz bušotine te zbog limitiranosti proizvodnje i nemogućnosti obavljanja mjerenja, cementacije i instrumentacije u takvim bušotinama. Rijetki projekti na kojima su bile izrađene bušotine malog promjera pokazali su se višestruko isplativijima. U SAD-u su tijekom 1950-ih godina izrađene bušotine malog promjera koje su bile 40% do 60% jeftinije nego li konvencionalne bušotine. Kasnije su slični projekti dovršeni u Kanadi i Švedskoj u kojoj su troškovi smanjeni za 50% pa čak i za 75%. Značajnija izrada bušotina malog promjera započela je krajem 1980-ih godina, a bila je uzrokovana smanjenjem cijene nafte te potrebom za smanjenjem troškova i poboljšanjem proizvodnih kapaciteta. Bušotine malog promjera najčešće se koriste u sljedeće svrhe: istražno bušenje s kontinuiranim jezgrovanjem, bušenja na kopnu i na moru, ponovno opremanje starih bušotina, izradu horizontalnih i višekanalnih bušotina (*engl. multilateral wells*) te produljenje postojećeg kanala bušotine do nove određene dubine (Randolph et al., 1991; Golub, 2005; Millheim et al., 1995).

Kao glavna prednost bušotina malog promjera u odnosu na konvencionalne bušotine navodi se smanjena cijena izrade i opremanja. To smanjenje cijena očituje se kroz: smanjenu količinu iznesenih čvrstih čestica iz bušotine, lakšu i manju opremu te smanjenu količinu upotrijebljenih fluida. Isto tako, postrojenja za izradu bušotina malog promjera ne zahtijevaju istu površinu kao postrojenja za izradu konvencionalnih bušotina pa su ona puno prihvatljivija za okoliš.

2.1. Načini izrade bušotina malog promjera

Bušotine malog promjera, obzirom na sklop alatki koji će se koristiti u bušotini, mogu biti izrađene na dva načina (Golub, 2005):

- sklopom bušaćih alatki i
- savitljivim tubingom.

U stijenama male čvrstoće moguće je primijeniti tehniku izrade bušotina malog promjera mlazom isplake velike brzine, međutim zbog svoje specifičnosti i ograničenosti primjene ova metoda se rijetko koristi.

2.1.1. Izrada bušotina malog promjera primjenom sklopova bušaćih alatki

Glavne razlike sklopa alatki za izradu bušotina malog promjera u odnosu na konvencionalni sklop alatki su jedinična težina i promjer alatki. Za izradu bušotina malog promjera uglavnom se mogu koristiti iste alatke kao i za izradu konvencionalnih bušotina, samo što promjer alatki onda mora biti manji od 152,4 mm (6"). Sklop za izradu bušotina malog promjera najčešće se sastoji od sljedećih dijelova (Golub, 2005):

- dlijeta,
- stabilizatora,
- uronjenog motora (vijčanog ili motora s kosim prijelazom ili zakošenim kućištem) i
- telemetrijskog sustava.

Bušaće šipke koje se koriste za izradu bušotina malog promjera manje su duljine u odnosu na konvencionalne bušaće šipke. Duljina konvencionalnih bušaćih šipki je oko 9 metara (30 ft), dok se za izradu bušotina malog promjera koriste bušaće šipke duljine od 1 do 6 m (3,3 do 19,7 ft). Uobičajeni promjeri bušaćih šipki iznose između 25,4 mm (1") i 127 mm (5"). Smanjena težina niza bušaćih šipki smanjit će abraziju kanala bušotine, ali isto tako smanjiti čvrstoću samog niza. Sklopovi alata na dnu bušotina jako su osjetljivi na prevelika opterećenja prenesena na dlijeto, pri čemu može doći do znatnih oštećenja dlijeta. Uglavnom se za izradu bušotina malog promjera koriste polikristalinska dijamantna dlijeta (PDC) ili termički stabilna polikristalinska dijamantna dlijeta (TSP) jer ona mogu izdržati veće brzine rotacije (Randolph et al., 1991).

Za izradu bušotina malog promjera najčešće se koriste (Golub, 2005):

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

2.1.1.1. Upravljivi sustav

Upravljivi sustav razvijen je kako bi se smanjile vibracije koje su nastajale pri izradi usmjerenih kanala bušotina i koje bi dovodile do značajnih oštećenja alata. Pravilnom primjenom upravljivog sustava, moguće je ostvariti značajne ekonomske dobiti.

Sastav upravljivog sustava koji se primjenjuje za izradu bušotina je sljedeći (slika 2-1):

- dlijeto,
- uronjeni motor,
- telemetrijski sustav i
- stabilizator.



Slika 2-1. Primjer upravljivog sustava (Gaurina-Međimurec, 2015)

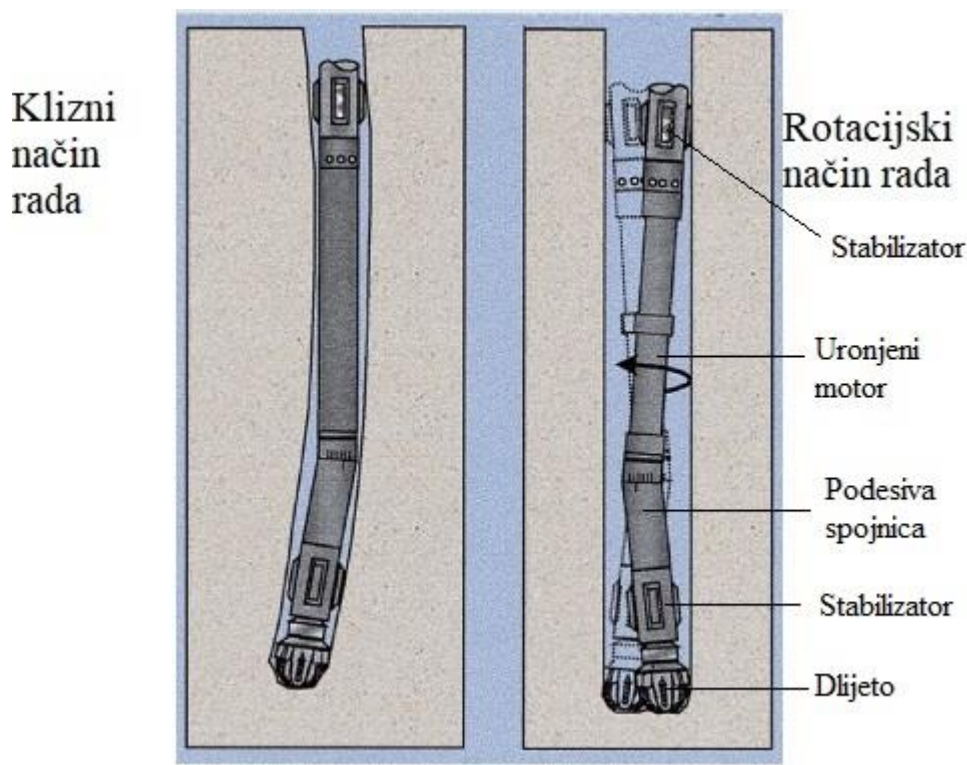
Pri izradi bušotine moguće je koristiti dva načina rada upravljivog sustava (slika 2-2):

- 1) orijentacijski ili klizni način rada (*engl. oriented, sliding mode*) – ova operacija izvodi se kada je u sklopu bušaćih alatki postavljen kosi prijelaz, motor sa zakošenim kućištem ili obje komponente, rotacija dlijeta ostvarena je uronjenim motorom pri čemu niz bušaćih alatki ne rotira. Glavni nedostaci pri radu kliznim načinom su: otežano zadržavanje orijentacije alatki, slabo čišćenje kanala bušotine, manja mehanička brzina bušenja, nepravilnost stijenki kanala bušotine te povećana opasnost od diferencijalnog prihvata (Gaurina-Međimurec, 2015);
- 2) rotacijski način rada (*engl. rotary mode*) – ovaj način izrade bušotine uključuje rotaciju niza bušaćih alatki, a negativne pojave primjenom ovog načina su sljedeće: veće vibracije koje mogu uzrokovati oštećenja motora i telemetrijskog sustava, ubrzano trošenje dlijeta te poteškoće pri obavljanju karotaznih mjerenja zbog povećanog promjera kanala bušotine (Gaurina-Međimurec, 2015).

Tri su kategorije dostupnih upravljivih sustava (Golub, 2005):

- s kosim prijelazom iznad motora,
- s podesivom zakošenom spojnicom iznad motora i
- s podesivim zakošenim kućištem motora s jednim ili dva zakošenja.

Pri korištenju upravljivih sustava u sklop alata potrebno je ugraditi i stabilizatore. Njihovom ugradnjom ostvaruje se povećani kontakt sa stijenkama kanala bušotine smanjujući opterećenje koje se prenosi na dlijeto te se to smatra glavnim nedostatkom primjene upravljivih sustava za izradu bušotina (Golub, 2005).



Slika 2-2. Rotacijski i klizni način rada upravljivog sustava (Gaurina-Međimurec, 2015)

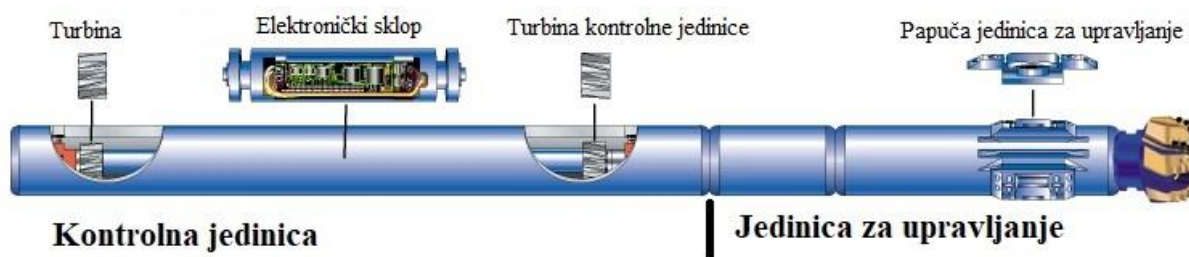
2.1.1.2. Rotirajući upravljivi sustav

Rotirajući upravljivi sustav razvijen je početkom 1990-ih godina, a njegova se primjena od tada pokazala ekonomski isplativom pri izradi bušotina malog promjera tako što omogućuje skraćenje vremena izrade bušotine. Osim velike mehaničke brzine bušenja i pouzdanosti, ostale prednosti primjene ovog sustava su (Golub, 2005):

- jednoliko skretanje kanala bušotine,
- izrada kanala bušotine glatkih stijenki,
- ostvarivanje kontinuirane rotacije alata,
- veći doseg horizontalnog dijela bušotine,
- bolje čišćenje kanala,
- manji rizik od prihvata te
- ušteda vremena i posljedično smanjenje troškova izrade bušotine.

Rotirajući upravljivi sustav sastoji se od dvije glavne jedinice prikazane na slici 2-3 (Golub, 2005):

- 1) jedinica za upravljanje – sadrži tri papuče pričvršćene s vanjske strane, kojima se upravlja protokom isplake kroz rotirajući ventil. Kada je aktivirana, papuča se otvori za 1 cm (slika 2-4). Rotirajući ventil je osovinom spojen na kontrolnu jedinicu kako bi se kontrolirala točka guranja. Dio za upravljanje sadrži i univerzalnu spojnicu za prenošenje torzije i opterećenja na dlijeto, ali i dopuštanje odmaka osi dlijeta od osi alata što omogućava kontrolu putanje kanala bušotine. Jedinica za upravljanje postavljena je odmah iznad dlijeta;
- 2) kontrolna jedinica – jedinica se nastavlja na jedinicu za upravljanje te ima vlastiti izvor napajanja, elektronički sklop, senzor i kontrolni mehanizam. Kontrolnom se jedinicom omogućava konstantno mjerenje smjera i kuta odklona.



Slika 2-3. Rotirajući upravljivi sustav (Gaurina-Međimurec, 2015)



Slika 2-4. Prikaz aktivirane i neaktivne papuče rotirajućeg upravljivog sustava (Gaurina-Međimurec, 2015)

2.1.2. Izrada bušotina malog promjera primjenom savitljivog tubinga

Drugi način izrade bušotina malog promjera uključuje primjenu savitljivog tubinga, kojeg mali promjeri čine idealnim za izradu bušotina malog promjera. Kako se savitljivi tubing primjenjuje i kod izrade bočnih bušotina više o njegovoj primjeni bit će rečeno u nastavku rada.

3. BOČNE (RE-ENTRY) BUŠOTINE

Pojam „re-entry bušotine“ u englesko-hrvatskom enciklopedijskom rječniku istraživanja i proizvodnje nafte i plina determiniran je kao svako produljenje kanala postojeće vertikalne ili horizontalne bušotine, ali i skretanje kanala postojeće bušotine tj. bušenje bočnog kanala iz postojeće neproduktivne ili niskoproduktivne bušotine. Prema Joshiju, bočne bušotine su sve one bušotine koje su izrađene iz postojećih kanala uspravnih ili zakrivljenih bušotina.

Izrada bočnih bušotina u naftnoj industriji poznata je od sredine 1950-ih godina. Te bušotine koristile su se za zaobilaženje oštećenih formacija ili mehaničkih poteškoća u kanalu bušotine, ali isto tako uspješno su primjenjivane u iskorištavanju novih proizvodnih zona uz ostvarivanje uštede jer se ne bi trebala bušiti u potpunosti nova bušotina, već bi se djelomično iskoristio postojeći kanal bušotine (Hill et al., 1996).

Prednost izrade bočnih bušotina leži u tome što nije potrebno prikupljati sve podatke koji bi se u slučaju izrade potpuno nove bušotine morali prikupiti. Kod izrade bočnih bušotina koriste se podaci o slojevima iz prethodno izrađenih bušotina, odabiru se fluidi na temelju već poznatih uvjeta u bušotini, koristi se bušaći alat prema već poznatim i provjerenim podacima, a sve to u konačnici omogućava uštedu vremena, novca i po završetku izrade bušotine omogućeno je povećanje proizvodnje (Vuković, 2000).

3.1. Postupak izrade bočne bušotine

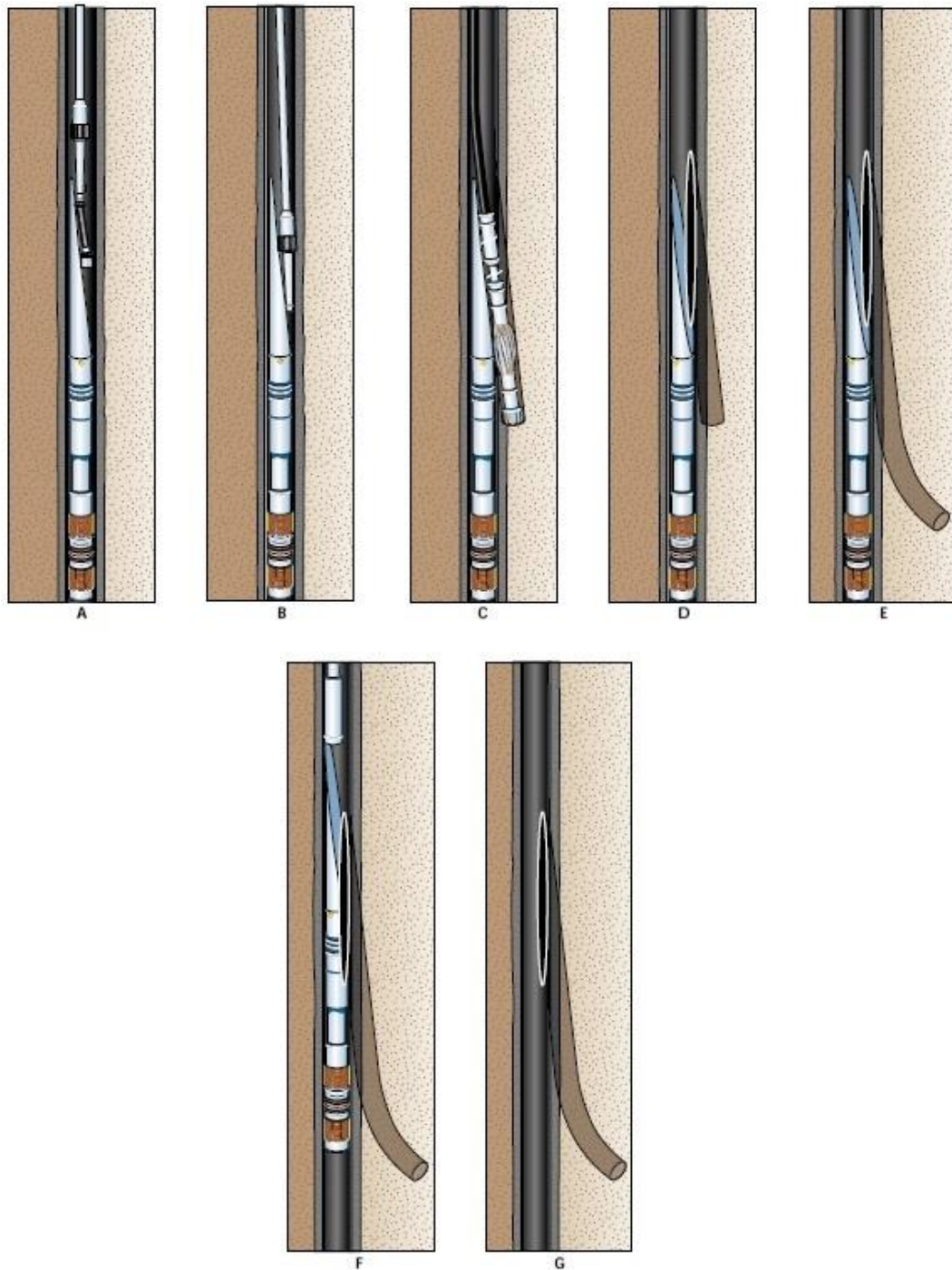
Prije izrade bočne bušotine potrebno je odraditi pripremne radove. Ti pripremni radovi često uključuju transport i montažu postrojenja, izvlačenje stare opreme iz bušotine, zatvaranje perforacija utiskivanjem cementa pod visokim tlakom (*engl. squeezing*) te instrumentiranje alata iz bušotine. Nakon toga potrebno je obaviti elektrokarotazna mjerenja u bušotini kako bi se dobili podaci u području skretanja kanala bušotine te kako bi se osigurala visoka kvaliteta cementnog kamena u svrhu smanjenja mogućnosti prodora plina između zaštitnih cijevi i cementnog kamena.

3.1.1. Načini izlaska iz postojećeg kanala bušotine

Dva su osnovna načina izlaska iz postojećeg kanala bušotine (Hill et al., 1996; Vuković, 2000):

- skretanje korištenjem klina i glodača,
- postavljanje cementnog mosta i otvaranje prozora sklopom alatki za glodanje.

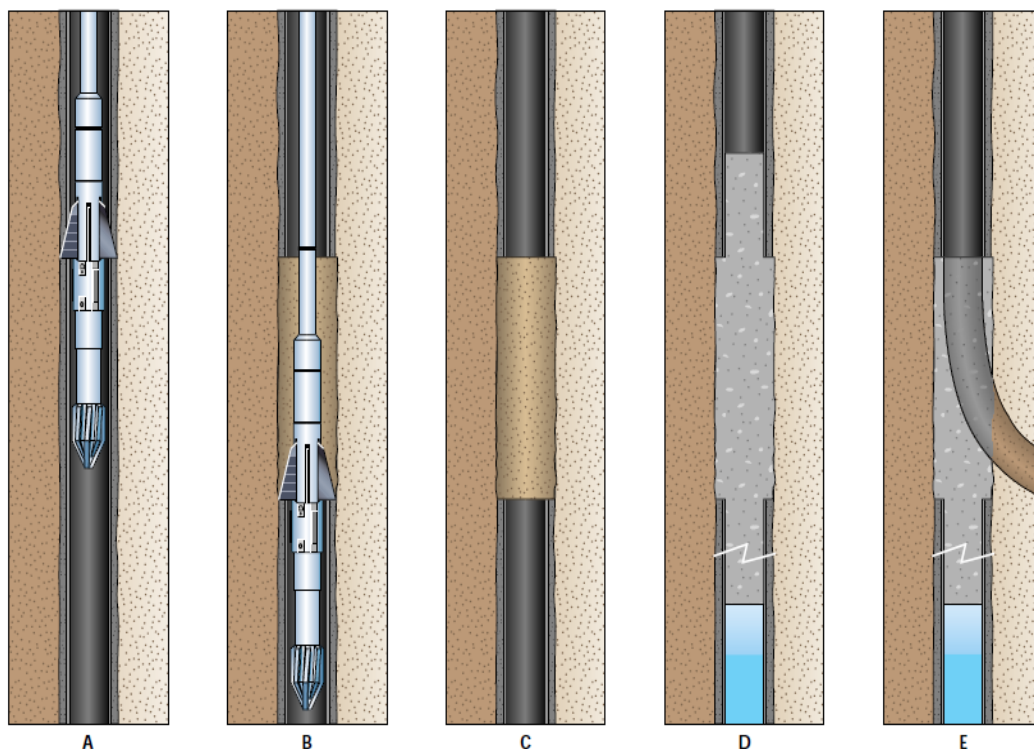
Korištenjem klina za skretanje bitno je pravilno orijentirati klin i nakon toga progodati prozor na dubini skretanja kanala (*engl. kick-off point – KOP*). Orijentacija klina obavlja se korištenjem žiroskopa, a klin koji se koristi može biti stalni ili izvlačivi. Stalni klin zahtjeva postavljanje cementnog mosta koji služi kao oslonac klinu, dok se izvlačivi klin postavlja aktiviranjem sidrenih pakera te se po završetku operacija uklanja iz bušotine.



Slika 3-1. Izrada bočnog kanala korištenjem klina i glodača (Hill et al., 1996)

Operacija otvaranje prozora započinje spuštanjem klina i njegovom orijentacijom u bušotini (slika 3-1, A). Nakon aktiviranja sidrenog pakera, rezanjem zatika otpušta se glodač za početno glodanje koji inicira otvaranje prozora u koloni zaštitnih cijevi prodiranjem nekoliko centimetara u kolonu (B). Zamjenom alata tj. ugradnjom glodača većeg promjera i glodača-proširivača proširuje se i uglađuje otvor (C). Po završetku glodanja započinje se s bušenjem bočnog kanala (D). Klin se dalje koristi za vođenje bušačkog niza, a kasnije i alatki za opremanje u bočni kanal (E). Nakon završetka bušenja i opremanja bušotine (F), sidreni pakeri se mogu deaktivirati i klin se može izvaditi iz bušotine (G). Nedostatak primjene ove metode očituje se u nemogućnosti izrade bočnog kanala u jednom manevru. Naime za izradu bočnoga kanala primjenom ovog načina, potrebno je nekoliko manevara za promjenu sastava alata. Isto tako za pravilno pozicioniranje i orijentaciju klina i niza alatki potrebno je nekoliko puta koristiti žiroskop (Hill et al.,1996).

Skretanje postavljanjem cementnog mosta uz upotrebu alata za glodanje ima određene prednosti u odnosu na upotrebu klina za skretanje. Prvenstveno se to odnosi na mogućnost izrade bočnog kanala u jednom manevru, što doprinosi većoj brzini izrade kanala. Isto tako nema potrebe za korištenjem žiroskopa u svrhu orijentiranja te se kod ovakvog načina izlaska iz vertikalne bušotine mogu odabrati manji polumjeri zakrivljenosti što dopušta postavljenje točke skretanja (KOP) bliže željenoj dubini (*engl. target*). Postupak izrade bočnog kanala prikazan je na slici 3-2.



Slika 3-2. Izrada bočnog kanala uz primjenu cementnog mosta i glodača (Hill et al., 1996)

Specijalni sklop alatki spušta se na određenu dubinu te se aktiviraju noževi koji se zabijaju u zaštitne cijevi i cementni kamen (A). Spuštanjem niza glodač otvara određenu sekciju (B). Nakon glodanja potrebno je bušotinu pripremiti za postavljanje cementnog mosta (C). Potom se cementira izgledana sekcija i to tako da dio cementne kaše ostane unutar zaštitnih cijevi s donje i gornje strane izgledanog intervala zaštitnih cijevi (D). Postavljeni cementni most drži donji dio bušotine permanentno izoliranim. Na kraju se započinje s izradom bočnog kanala korištenjem pravilno odabranog dubinskog bušačkog sklopa (E). Obično je za skretanje kanala bušotine korištenjem magnetskog sustava potrebno izgledati oko 18 m zaštitnih cijevi, dok se primjenom žiroskopa ta duljina značajno smanjuje (Hill et al.). Kod glodanja zaštitnih cijevi jako je važno odabrati isplaku s odgovarajućim svojstvima kako bi se ostvarilo zadovoljavajuće čišćenje kanala bušotine. Za operacije glodanja se preporučuje upotreba polimernih isplaka koje imaju bolja svojstva od glinovitih isplaka, dok se primjena isplaka na bazi ulja uopće ne preporuča (Hill et al, 1996).

Odluka o načinu skretanja koji će se odabrati ovisit će prvenstveno o sljedećim faktorima (Vuković, 2000):

- unutarnjem promjeru zaštitnih cijevi postojeće bušotine,
- vremenu trajanja cementacije,
- cijeni bušačkog postrojenja i vremenu izvođenja postupka,
- dubini zalijeganja i mehaničkim svojstvima formacije u razini točke skretanja kanala bušotine,
- predviđanju napretka izrade bočnog kanala i
- broju bočnih kanala bušotine.

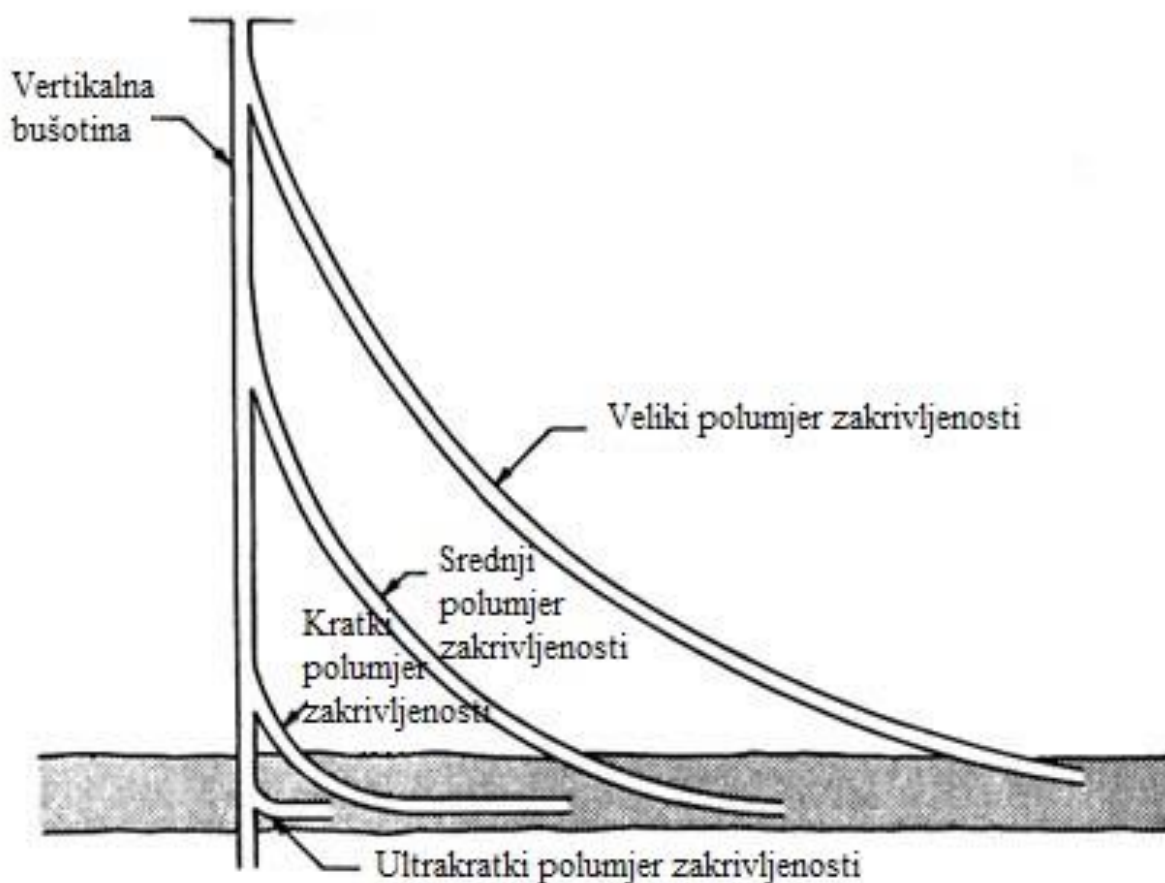
3.1.2. Načini izrade bočne bušotine

Bočne bušotine mogu se izraditi na nekoliko načina. U praksi se najčešće primjenjuje tehnologija izrade bočne bušotine sklopom bušačkih alatki ili izrada bočnih bušotina primjenom savitljivog tubinga. Osim prije navedenih načina, bočne bušotine mogu se izraditi i pomoću mlaza isplake velike brzine, međutim taj se način ne primjenjuje često u praksi.

3.1.2.1. Alat za izradu bočne bušotine sklopom bušaćih alatki

Sklop bušaćih alatki koji će se koristiti za izradu bočne bušotine ovisit će o tipu bočne bušotine tj. ovisit će o polumjeru zakrivljenosti pojedine bočne bušotine. Prema Joshiju (1991), horizontalne i bočne bušotine mogu se podijeliti na 4 tipa obzirom na polumjer zakrivljenosti (slika 3-3), koji se definira kao polumjer kružnice koja je dio putanje od vertikalnog do horizontalnog kanala bušotine (Vuković, 2000):

- bušotine ultrakratkog polumjera zakrivljenosti (*engl. ultrashort radius*),
- bušotine kratkog ili malog polumjera zakrivljenosti (*engl. short radius*),
- bušotine srednjeg polumjera zakrivljenosti (*engl. medium radius*) i
- bušotine velikog polumjera zakrivljenosti (*engl. long radius*).



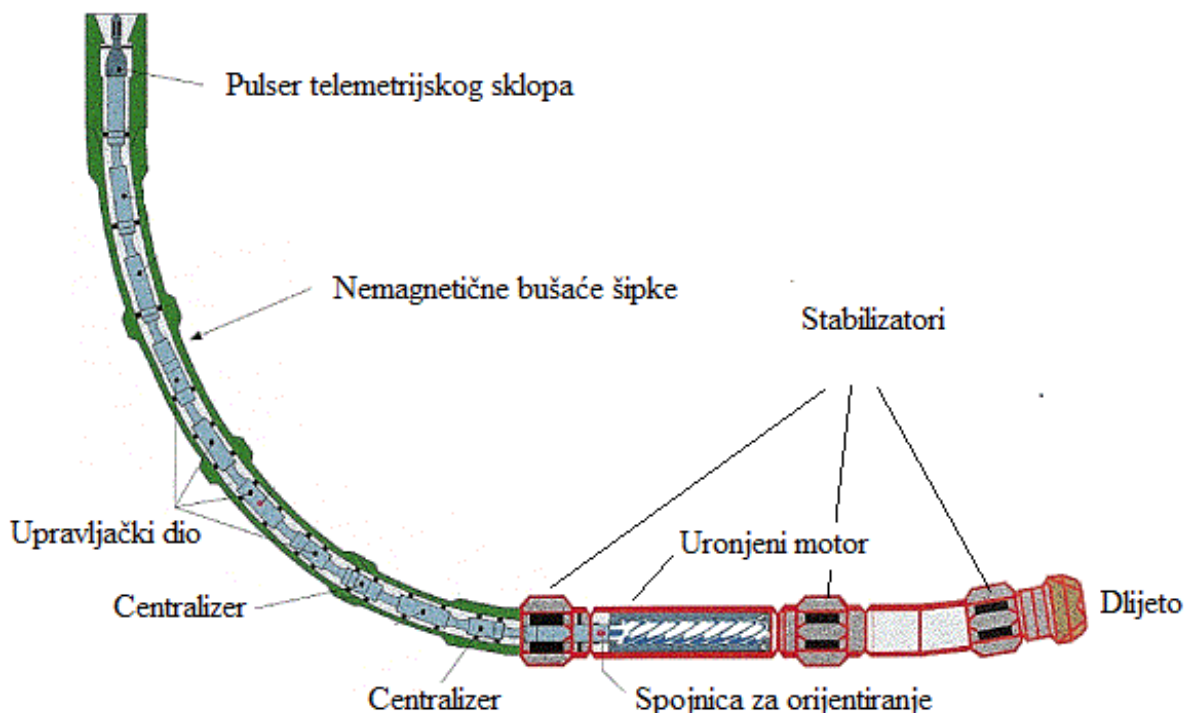
Slika 3-3. Tipovi bočnih bušotina (www.nap.edu)

U svijetu se najčešće izrađuju bušotine kratkog polumjera zakrivljenosti, što omogućuje upotrebu najvećeg dijela već izrađene vertikalne bušotine (Vuković, 2000). Polumjer zakrivljenosti kod bočnih bušotina kratkog polumjera zakrivljenosti iznosi od 6 do 12 m (20 do 40 ft), povećanje kuta otklona je od 1,5° do 3°/0,3 m, a horizontalni dohvat ovakvih bušotina je između 91 m i 240 m (300 – 800 ft) (Joshi, 1991).

Tipični sklop bušačih alatki za izradu takve bušotine sastoji se od sljedećih dijelova (Heraković, 2003):

- dlijeta,
- spojnice za orijentiranje,
- uronjenog motora,
- protupovratnog ventila,
- stabilizatora,
- zglobnih spojnica i
- upravljačkog dijela sklopa.

Na slici 3-4 prikazan je sklop alatki kompanije *Baker Hughes*, korišten za izradu bušotina kratkih polumjera zakrivljenosti.



Slika 3-4. Sklop bušačih alatki korišten za izradu bušotina kratkog polumjera zakrivljenosti (www.ogj.com, 1997)

Za izradu bušotina srednjeg polumjera zakrivljenosti može se koristiti sastav alatki koji uključuje sljedeće komponente (slika 3-5) (Vuković, 2000):

- dlijeto,
- uronjeni motor,
- kosi prijelaz,
- stabilizatore,
- telemetrijski sustav,
- nemagnetične šipke,
- elastične prijelaze,
- udarač,
- teške bušaće šipke i
- bušaće šipke.



Slika 3-5. Sklop bušaćih alatki korišten za izradu bušotina srednjeg polumjera zakrivljenosti (Heaton i Rotel, 1990)

3.1.2.2. Alat za izradu bočnih bušotina uz pomoć savitljivog tubinga

Klasični sastav alata za bušenje uz primjenu savitljivog tubinga sadrži sljedeće komponente (Vuković, 2000; Heraković, 2003):

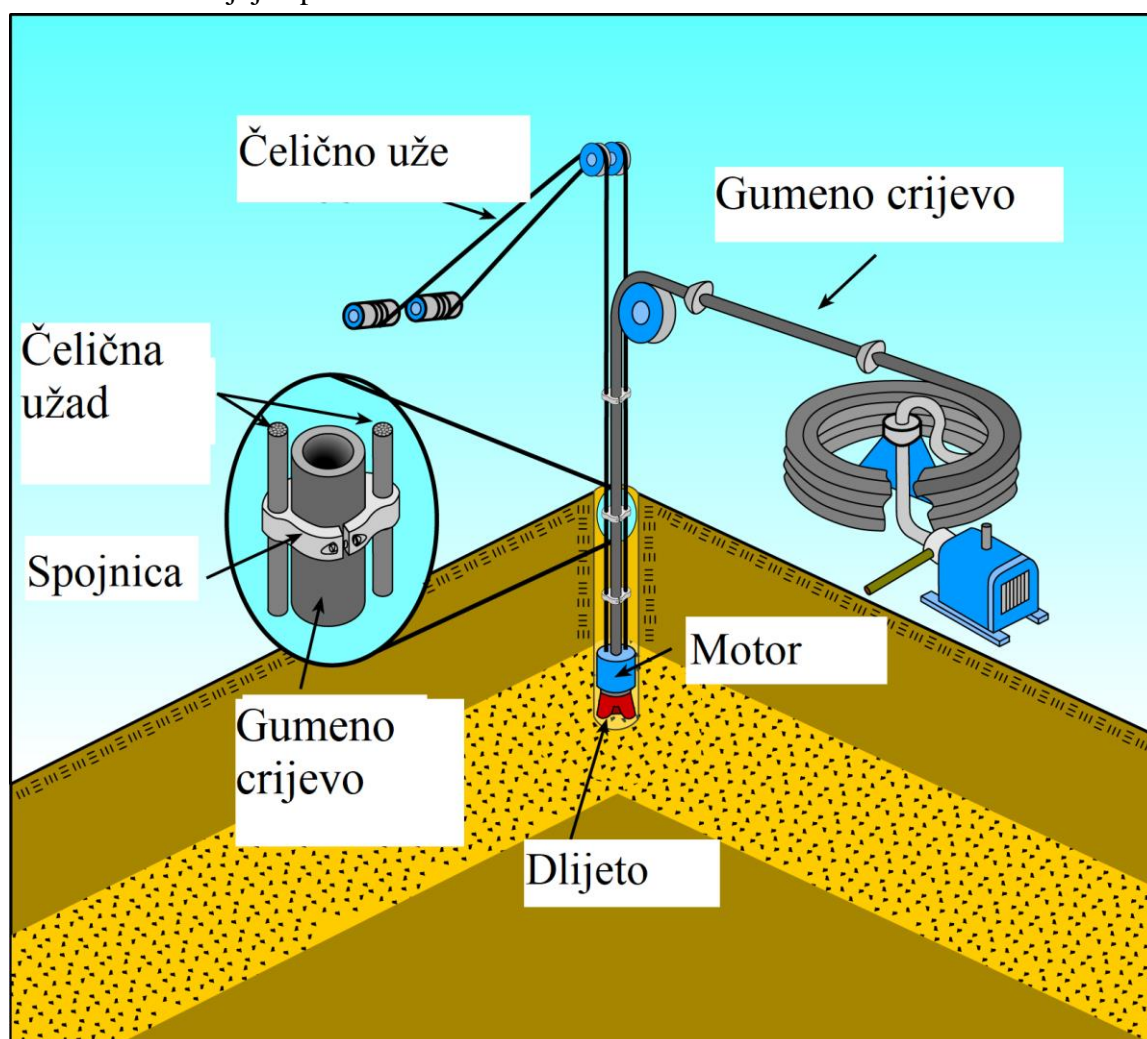
- dlijeto,
- podesivu spojnicu,
- uronjeni motor,
- telemetrijski sustav za mjerenja u kanalu bušotine,
- spojnicu za orijentiranje,
- sigurnosnu spojnicu za brzo otpajanje u slučaju akcidentnih situacija,
- protupovratni ventil,
- spojnicu za spajanje alatki sa savitljivim tubingom i
- savitljivi tubing.

Primjena savitljivog tubinga detaljnije će biti opisana u sljedećem poglavlju.

4. BUŠENJE UZ PRIMJENU SAVITLJIVOG TUBINGA

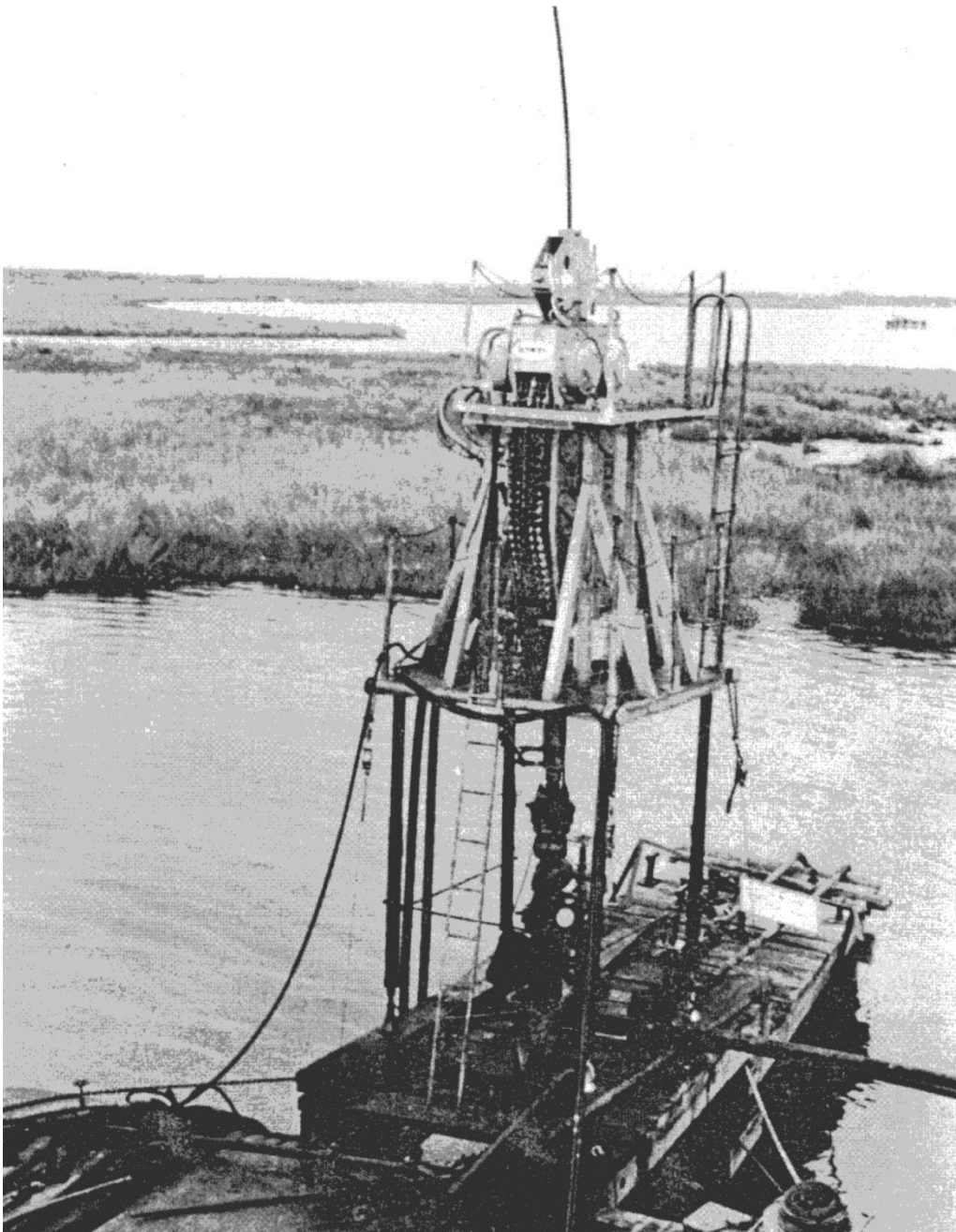
Savitljivi je tubing, prema uvriježenoj definiciji, cijev malog promjera i visoke čvrstoće, izrađena od čelika ili polimernih materijala ojačanih vlaknima od stakla ili kevlar, koja se nakon proizvodnje namata na bubanj i tako namotana dovozi na bušotinu (Matanović i Moslavac, 2011).

Ideja o upotrebi neprekinutog niza cijevi koje se mogu koristiti u raznim operacijama vezanim uz izradu bušotine, javila se već 1930-ih godina kada je Clyde E. Bannister predstavio svoju viziju savitljive cijevi koja se prilikom spuštanja i vađenja može odmotavati i namotavati na površini. Originalni koncept je koristio gumeno crijevo koje je sadržavalo spojnice na koje se moglo zakačiti čeličnu užad za pružanje potpore u izdržavanju aksijalnih opterećenja težine gumenog crijeva i krutog alata (slika 4-1). Ovim sustavom izrađeno je oko 1 220 m (4 000 ft) bušotine, ali zbog nepostojanja dovoljno jakog motora u to vrijeme, odustalo se od daljnje upotrebe.



Slika 4-1. Bannisterov koncept savitljivog tubinga (www.petrowiki.org, 2012)

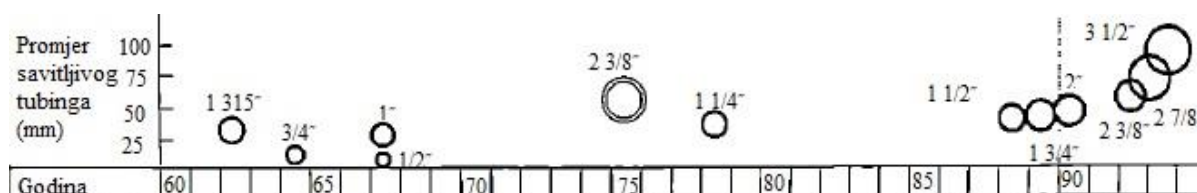
Početakom 1950-ih nastavilo se s usavršavanjem tehnologije za upotrebu savitljivog tubinga. Prvi koncept za upotrebu neprekinutog niza čeličnih cijevi u bušotinskim operacijama izradili su George D. Priestman i Gerald Priestman, dok su George H. Calhoun i Herbert Allen u svom konceptu dali osnovu za izradu injektora savitljivog tubinga sa suprotno rotirajućim lancima. Suradnjom kalifornijske naftne kompanije (*engl. Californian Oil Company*) i kompanije Bowen Tools, 1962. godine izrađen je prvi funkcionalni prototip injektora savitljivog tubinga te je bio korišten u ispiranju pijeska u plinskim i naftnim bušotinama u Meksičkom zaljevu (slika 4-2).



Slika 4-2. Prototip injektorskog sklopa (www.petrowiki.org, 2012)

Tijekom 1970-ih i 1980-ih godina servisne kompanije nastavile su s razvojem injektorskih sklopova, a istovremeno se unapređivala kvaliteta i čvrstoća savitljivog tubinga. Savitljivi se tubing od svojih početaka u konvencionalnoj upotrebi koristi za gušenje i pročišćavanje bušotina, iskušavanja bušotina, stimulacijske radove u bušotinama, smještaj fluida, testiranja i odjeljivanje intervala. U nekonvencionalnoj upotrebi savitljivi se tubing može primijeniti za ugradnju i postavljanje čepova i pakera, perforiranje, mjerenje tlaka i temperature, postavljanje pješčanih zasipa, selektivno stimuliranje intervala, instrumentiranje, a od 1990-ih pa do današnjih dana savitljivi tubing se primjenjuje u svrhe bušenja (Vuković, 2000; Golub, 2005, Hatala et al., 1995).

U konvencionalnim operacijama se najčešće primjenjuje savitljivi tubing promjera 25,40 mm (1"), 31,75 mm (1 ¼") i 38,10 mm (1 ½"). U svrhe bušenja se ne preporuča upotreba savitljivog tubinga promjera manjeg od 50,80 mm (2"). U bušačim operacijama najčešće se koristi savitljivi tubing vanjskog promjera 60,33 mm (2 3/8") i 73,03 mm (2 7/8"), a ponekad se primjenjuje i savitljivi tubing promjera 88,90 mm (3 ½"). Bušotine koje se izrađuju tubingom promjera 60,33 mm (2 3/8") mogu dosegnuti konačnu mjerenu dubinu od 4 200 m te se mogu primjenjivati pri bušenju kroz niz uzlaznih cijevi (*engl. Through tubing drilling*). Primjena savitljivog tubinga promjera 73,03 mm (2 7/8") opravdana je u slučajevima kada se treba primijeniti veće opterećenje na dljeto i veća brzina protjecanja isplake u prstenastom prostoru, dok je ograničavajući faktor primjene tubinga tog promjera konačna dubina koja maksimalno može iznositi 3 400 m. Povećanjem vanjskog promjera savitljivog tubinga omogućena je primjena većih opterećenja i postizanje većih brzina protjecanja isplake u prstenastom prostoru koje će posljedično utjecati na kvalitetnije čišćenje kanala bušotine što je od velike važnosti u zakrivljenim dijelovima kanala (Golub, 2005; Vuković, 2000). Na slici 4-3 prikazan je razvoj savitljivog tubinga od 1960. do 1995. godine.



Slika 4-3. Prikaz povećanja promjera savitljivog tubinga (Hatala et al., 1995)

Može se primijetiti da su s početkom upotrebe savitljivog tubinga u svrhe bušenja ostvarena povećanja promjera savitljivog tubinga.

Prednosti koje omogućuje bušenje uz upotrebu savitljivog tubinga su sljedeće (Golub, 2005; Vuković, 2000; Heraković, 2003; Hatala et al., 1995):

- povećana sigurnost postupka izrade kanala bušotine u uvjetima kada je tlak u bušotini ostvaren isplakom manji od slojnog tlaka (*engl. underbalanced drilling*),
- jednostavnije rukovanje zbog neprekidnosti tubinga,
- manja površina za smještaj tubinga,
- velika mobilnost postrojenja te kratak vremenski interval potreban za postavljanje postrojenja,
- smanjena mogućnost od prihvata alatki zbog neprekidnog optoka fluida,
- smanjenje troškova omogućeno bržom izradom bušotine zbog uklanjanja potreba spajanja bušaćih alatki te smanjenjem količine otpadnih materijala,
- mogućnost izrade bušotine bez prethodnog vađenja uzlaznih cijevi (*engl. through tubing drilling*) i
- mogućnost stalnih, visokokvalitetnih telemetrijskih mjerenja u realnom vremenu.

Nedostaci primjene savitljivog tubinga prilikom izrade bušotina su (Golub, 2005; Vuković, 2000; Heraković, 2003; Hatala et al., 1995):

- nemogućnost rotacije savitljivog tubinga,
- manja dubina i promjer bušotine u odnosu na konvencionalno bušenje,
- kraći radni vijek savitljivog tubinga od radnog vijeka konvencionalnog niza bušaćih alatki te
- manji protok fluida kroz prstenasti prostor kanala bušotine.

Prilikom bušenja horizontalnih bušotina često dolazi do velikih oštećenja pribušotinske zone što uvelike utječe na proizvodne karakteristike bušotine. Zbog velikog skin faktora, mnogi su projekti izrade horizontalnih bušotina napušteni. Oštećenje pribušotinske zone nemoguće je u potpunosti izbjeći, međutim primjenom odgovarajućih fluida i tehnika ono se može uvelike smanjiti. Jedna od najefikasnijih metoda smanjenja oštećenja je da se bušotina izrađuje u uvjetima podtlaka u kojima je slojni tlak veći od tlaka što će ga ostvariti fluid u bušotini (u tom slučaju najčešće dušik ili pjena). Najjednostavnija metoda kojom je moguće ostvariti trajno postizanje prije opisanih uvjeta u bušotini je korištenje savitljivog tubinga za izradu bušotine, a ujedno je to i najveća prednost korištenja savitljivog tubinga u bušaćim operacijama u odnosu na konvencionalni sklop alatki (Hatala et al, 1995).

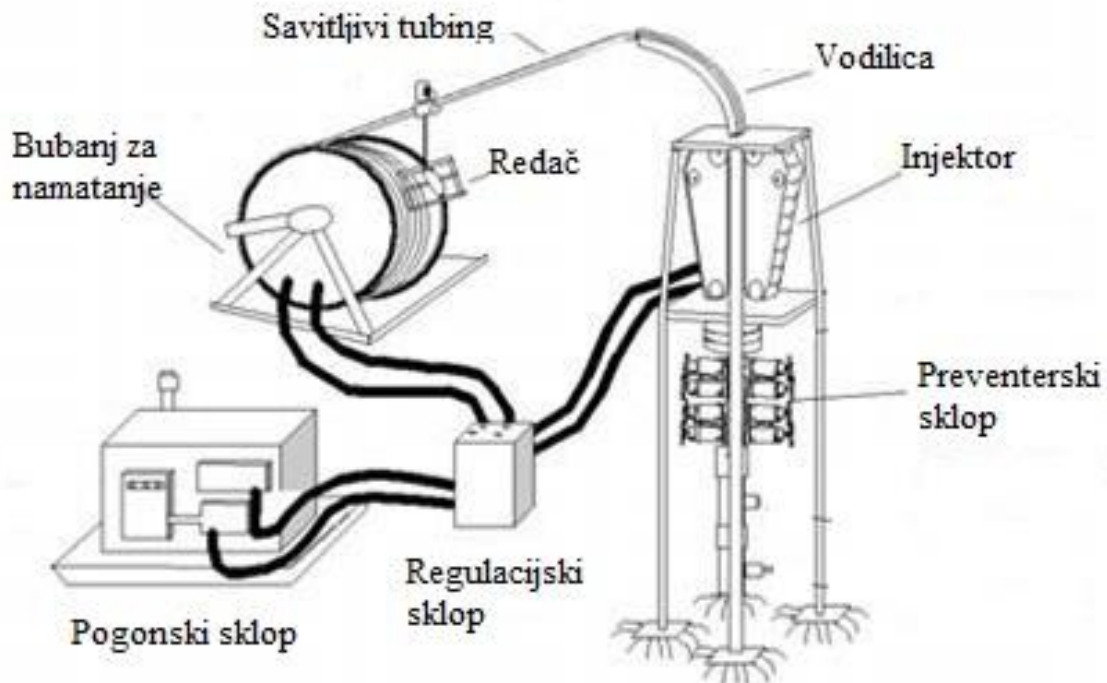
Odabir savitljivog tubinga zasniva se na odabiru minimalne vrijednosti naprezanja do granice elastičnosti, debljine stijenke i vanjskog promjera, a pri dizajniranju niza posebna se pažnja treba posvetiti sljedećim parametrima (Golub, 2005):

- težini savitljivog tubinga,
- otpornosti na vlačna i tlačna naprezanja,
- uvjetima u kanalu bušotine,
- utjecaju djelovanja tlaka koji se javlja kao posljedica trenja pri protjecanju fluida,
- duljini savitljivog tubinga i
- izvijanju savitljivog tubinga.

Materijal od kojeg se izrađuje savitljivi tubing mora biti dovoljno otporan na naprezanja uslijed savijanja, a u isto vrijeme treba imati dovoljnu čvrstoću da se odupre djelovanju naprezanja za vrijeme izrade bušotina. Kako se za vrijeme izrade kanala bušotine savitljivi tubing tlačno opterećuje radi prijenosa potrebnog opterećenja na dlijeto, potrebno je poznavati kritičnu silu izvijanja čije će premašivanje u početku dovesti do sinusoidalnog izvijanja, a daljnjim povećanjem tlačne sile i do spiralnog izvijanja savitljivog tubinga. Spiralno izvijanje uzrokovat će veći kontakt sa stijenkama kanala bušotine ili zaštitnih cijevi, a tim će se povećavati i sila trenja, što u konačnici može dovesti do uklinjenja izvijenog savitljivog tubinga. Danas se odabir savitljivog tubinga te određivanje kritičnih sila na savitljivi tubing bazira na kompjuterskom modeliranju prilikom kojeg se unose podaci o izgledu putanje, promjerima sekcija kanala bušotine, podaci o radnim fluidima i opterećenju na dlijeto, faktori trenja itd.

4.1. Postrojenje za rad sa savitljivim tubingom

Standardni elementi postrojenja za rad sa savitljivim tubingom prikazani su na slici 4-4 (Matanović i Moslavac, 2011):



Slika 4-4. Prikaz postrojenja za rad sa savitljivim tubingom (www.drilleng-group7-casngstrngdesig2.wikispaces.com)

1) **pogonsko-hidrauličko regulacijski sklop** – sastoji se od pogonskog stroja, uređaja za regulaciju rada bubnja, injektora i preventera te obično dvije hidrauličke sisaljke koje osiguravaju dobavu ulja potrebnu za rad preventera te pogon bubnja i injektora preko hidrauličkih motora.

2) **injektorski sklop** – glavni dijelovi ovoga sklopa su: injektor, vodilica savitljivog tubinga, indikator težine te nosač injektora. Energija za pokretanje injektorskog sklopa dobiva se preko većeg stupnja visokotlačnih hidrauličkih sisaljki.

Injektorom se savitljivi tubing utiskuje u bušotinu te se na njemu nadzire brzina kretanja savitljivog tubinga, a služi i za podržavanje cjelokupne težine savitljivog tubinga te izvlačenje savitljivog tubinga iz bušotine. Rad injektora omogućen je sustavom tarnog prijenosa, koji se sastoji od dva suprotno rotirajuća lanca sa segmentima koji odgovaraju poluobodu savitljivog tubinga. Gibanje savitljivog tubinga ostvareno je pri rotaciji lanaca, kada utori naliježu na savitljivi tubing te prenose gibanje.

Nosač injektora čini okvir ili postolje s podesivim nogama ili stupom čelične rešetkaste konstrukcije. Injektor je ovješeno o konzolu pričvršćeno na vrh stupa, a sam nosač je lancima pričvršćen za erupcijski uređaj.

Vodilica savitljivog tubinga je u obliku luka te na sebi sadrži određeni broj valjaka na koje se oslanja savitljivi tubing. Njezina svrha je zakretanje savitljivog tubinga s bubnja u uspravan položaj prije ulaska u injektor.

Indikator težine djeluje na hidrauličkom principu i služi za praćenje opterećenja injektora te se pomoću njega definiraju tlačne i vlačne sile u savitljivom tubingu.

3) bubanj s namotanim savitljivim tubingom i automatskim redačem– osovina bubnja postavljena je u ležištima potpornih stupova noseće konstrukcije, a rotacija bubnja ostvaruje se prijenosom natega lanaca na osovinu bubnja. Početak savitljivog tubinga spaja se preko kuglastog ventila na osovinu bubnja, dok je za šuplji kraj osovine bubnja prirubnicom spojena rotirajuća spojnica koja omogućuje obavljanje cirkulacije fluida za vrijeme utiskivanja i vađenja savitljivog tubinga. Automatski redač savitljivog tubinga pričvršćen je na osovinu bubnja. Na njemu je montirana mjedena vodilica za različite promjere, a posebni užlijebljeni vijak pomiče vodilicu lijevo-desno. Vijak je automatski pogonjen rotacijom osovine bubnja. Pri pravilnom radu za jedan okretaj bubnja, vodilica se pomakne za veličinu promjera namotanog savitljivog tubinga.

4) preventerski sklop – sastoji se od nekoliko hidrauličko-mehaničkih preventera, preventera s automatskim djelovanjem (*engl. stripper*) te odgovarajućih elemenata za spajanje na erupcijski uređaj. Preventer automatskog djelovanja smješten je na vrhu sklopa i on brtvi prostor oko savitljivog tubinga. Sastav hidrauličko-mehaničkog preventerskog sklopa je sljedeći:

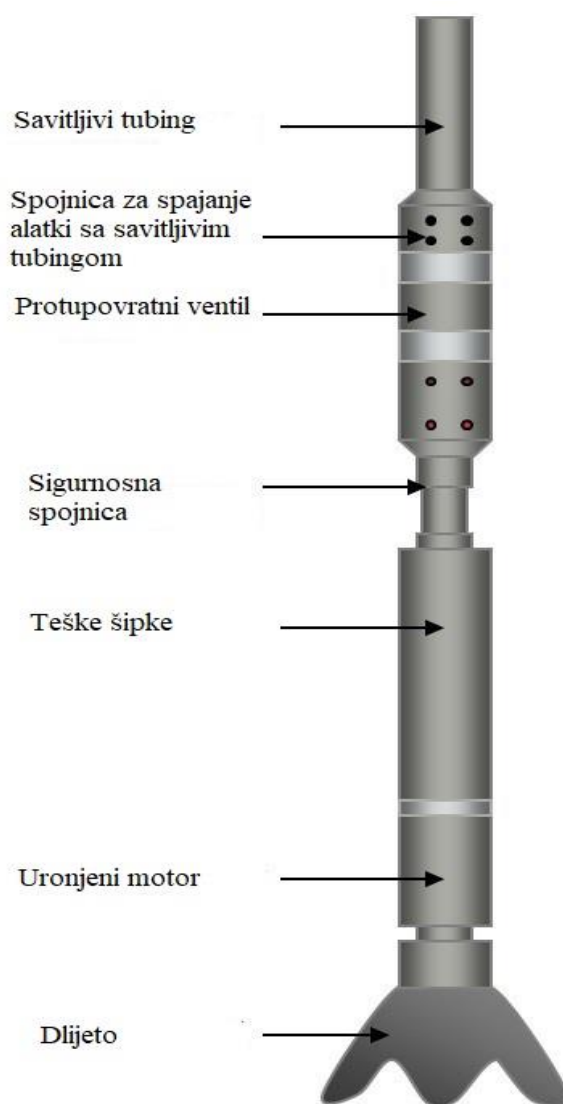
- preventer s čeljustima za zatvaranje punog presjeka kanala bušotine,
- sjekač savitljivog tubinga,
- prirubnice s ventilom za priključak voda za gušenje,
- klinovi za prihvat i
- preventer s čeljustima za brtvljenje prstenastog prostora.

Svaki dio preventerskog sklopa može se aktivirati na tri načina: hidraulički, ručnom sisaljkom ili mehanički okretanjem ručice.

4.2. Sklop alatki za bušenje uz primjenu savitljivog tubinga

Sastav krutog alata koji se koristi prilikom produljenja vertikalnog kanala bušotine obično čine (Hatala et al., 1995; Golub, 2005) (slika 4-5):

- dlijeto (najčešće polikristalinsko dijamantno dlijeto (*engl. polycrystalline diamond compact bit – PDC*), termički stabilno polikristalinsko dlijeto (*engl. thermally stable polycrystalline diamond bit – TSP*) ili žrvanjsko dlijeto),
- uronjeni motor (*engl. mud motor*),
- teške šipke,
- sigurnosna spojnica (*engl. hydraulic disconnect*),
- protupovratni ventil i
- spojnica za spajanje alatki sa savitljivim tubingom (*engl. coiled tubing adaptor*).



Slika 4-5. Sastav alata za bušenje vertikalnih bušotina uz primjenu savitljivog tubinga (www.ekomeri.com, 2015)

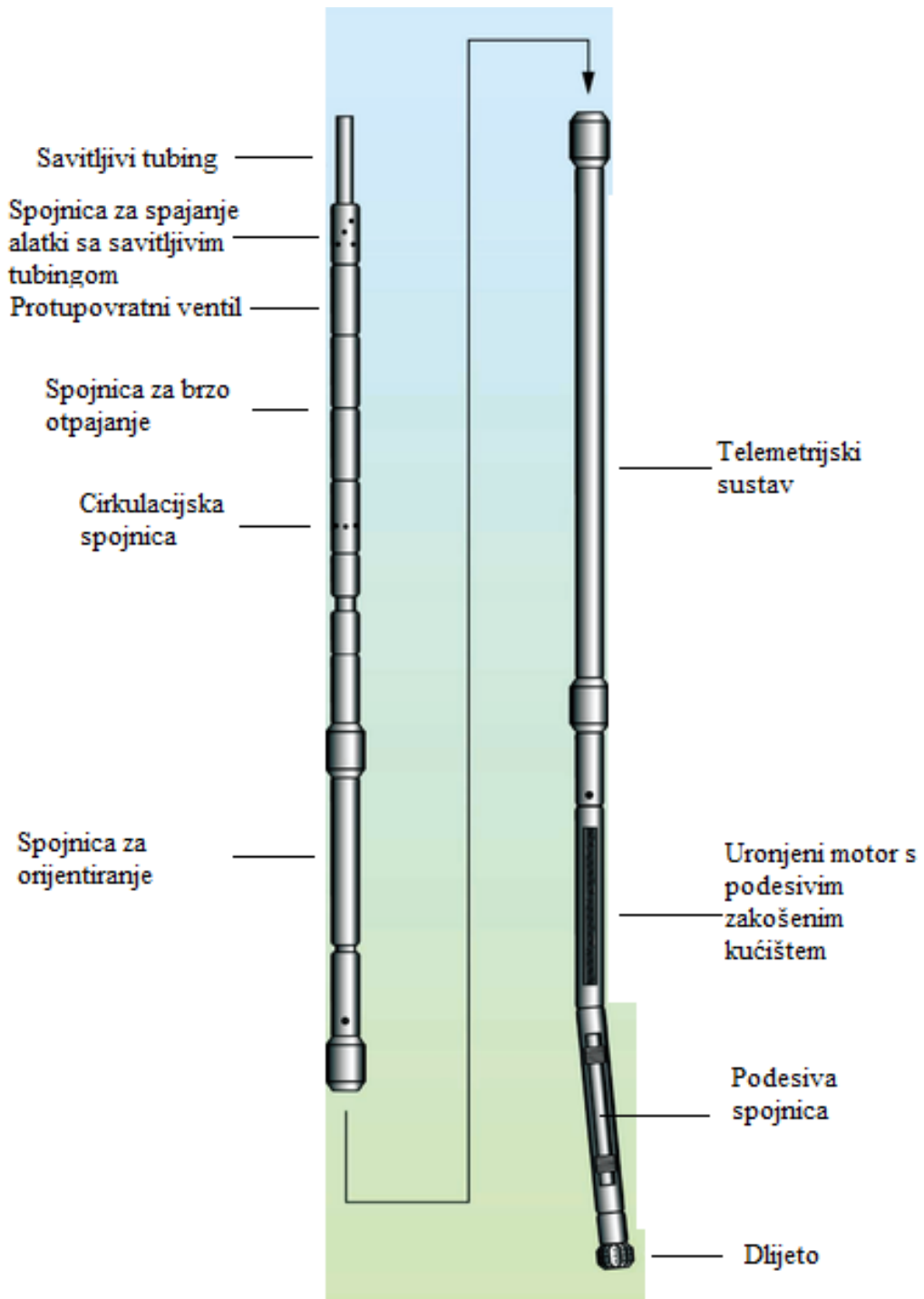
Sklop alatki koji se koristi pri usmjerenom i horizontalnom bušenju uz upotrebu savitljivog tubinga ima nekoliko dodatnih komponenti u odnosu na konvencionalni sklop alatki za bušenje. Uobičajeni sastav alata na dnu je (Heraković, 2003; Hatala et al. 1995) (slika 4-6):

- dlijeto,
- podesiva spojnica,
- uronjeni motor s podesivim zakošenim kućištem (*engl. adjustable bent housing*),
- telemetrijski sustav,
- spojnica za orijentiranje,
- cirkulacijska spojnica,
- spojnica za brzo otpajanje,
- protupovratni ventil i
- spojnica za spajanje alatki sa savitljivim tubingom.

Jedna od glavnih razlika u sastavu alata u odnosu na konvencionalni sklop je potreba za korištenjem spojnice za orijentiranje (*engl. orienter*) prilikom bušenja savitljivim tubingom. Razlog zbog kojeg se ta alatka ugrađuje leži u nemogućnosti rotiranja savitljivog tubinga. Spojnica za orijentiranje određuje smjer kanala bušotine usmjeravanjem podesivog kućišta u željenom smjeru ili kontroliranjem bočnih opterećenja na dlijeto kako bi se alat usmjerio u željenom pravcu.

Prve alatke za usmjeravanje koristile su olovni vijak koji bi osiguravao zakretni moment krutog alata kada bi pumpe bile isključene, dok bi se nova orijentacija zaključala ponovnom uspostavom cirkulacije. Usavršavanjem orijentacijskih alatki u upotrebu su ušle indeksirajuće orijentacijske alatke. Te alatke su naizmjeničnim pokretanjem i zaustavljanjem pumpi indeksirale orijentaciju niza, i to obično u koracima od 30° do 60°. Novije izvedbe orijentacijskih alatki koje su bazirane na pulsirajućem upravljanju uključuju primjenu pametnog prijelaza (*engl. smart sub*) koji ima sposobnost dešifriranja prenesenih poruka, promjenom brzine protoka isplake (coiled tubing drilling - petrowiki).

Kod druge vrste orijentacijskih alatki, orijentacija se ostvaruje hidraulički ili putem kablova. Primjena takve vrste orijentacijskih alatki uključuje ugradnju žica unutar savitljivog tubinga. Time se smanjuje efektivni unutarnji promjer tubinga te se ostvaruju veći gubici tlaka uslijed pojave trenja, ali isto tako se povećava jedinična težina samog tubinga. Ovi orijentacijski alati imaju mogućnost rotacije od približno 400° te su njihovom upotrebom postignuti puno točniji rezultati (coiled tubing drilling - petrowiki).



Slika 4-6. Sastav alata za bušenje koso usmjerenih i horizontalnih bušotina uz primjenu savitljivog tubinga (www.petrowiki.org, 2012)

4.3. Izrada bočnih bušotina malog promjera uz primjenu savitljivog tubinga

Savitljivi tubing se od početka primjene u svrhe bušenja uglavnom koristio za produljenje postojećih kanala te za izradu bočnih kanala bušotina. Zbog specifičnog promjera savitljivog tubinga koji se koristi u bušačim operacijama većina izrađenih bušotina ulazi u kategoriju bušotina malog promjera.

Kanada se smatra jednim od pionira primjena bušenja uz upotrebu savitljivog tubinga (Hatala et al., 1995). U Kanadi je uspješna primjena savitljivog tubinga pri izradi bočnih bušotina zabilježena polovicom 1970-ih, odnosno puno prije nego li se takva tehnologija počela značajnije koristiti u ostatku svijeta. Iz tablice 4-1 vidljivo je kako su prve kanadske bušotine izrađene primjenom savitljivog tubinga većinom bočne (*engl. re-entry*) bušotine, čiji promjer ne prelazi 152,0 mm (6"), a bušotine takvog promjera mogu se uvrstiti u skupinu bušotina malog promjera.

Tablica 4-1. Prikaz kanadskih bušotina izrađenih uz primjenu savitljivog tubinga u periodu 1974. – 1994. (Hatala et al., 1995)

Datum	Br. bušotina	Lokacija	Operator	Vrsta bušotine	Tip bušotine	Promjer savitljivog tubinga (mm)	Promjer bušotine (mm)	Dubina (m)
1974	2	Keg River, AB	Canadian Montana Gas	Bočna	Vertikalna	25.4	114.3	285
1975	1	Oyen, AB	(?)	Bočna	Vertikalna	25.4	114.3	443
1975	4	Bantry, AB	Alberta Eastern Gas Ltd	Nova	Vertikalna	60.3	139.7	486
1975	1	Lloydminster, AB	Husky Oil Ltd.	Bočna	Vertikalna	25.4	73.0	125
1976	4	Lougheed, AB	Sedger Resources Ltd.	Nova	Vertikalna	60.3	139.7	500
1976	1	Alderson, AB	PanCanadian Petroleum	Bočna	Vertikalna	25.4	114.3	390
1978	1	Alderson, AB	PanCanadian Petroleum	Bočna	Vertikalna	25.4	114.3	387
1980	1	Medicine Hat, AB	Gascan Resources Ltd.	Bočna	Vertikalna	25.4	114.3	418
1981	1	Alberta	Petro-Canada	Bočna	Vertikalna	25.4	114.3	328
Jan, '89	1	Liege, AB	Paramount Resources	Bočna	Vertikalna	31.75	114.3	460
Mar, '92	1	Bellis, AB	North Canadian Oils Ltd.	Bočna	Vertikalna	38.1	114.3	555
Jun, '92	1	Cactus Lake, Sask	Elan Energy Inc.	Nova	Vertikalna	50.8	121.0	876
Jun, '92	1	Big Valley, AB	Gulf Canada Resources Inc.	Bočna	Horizontalna	50.8	104.8	670
Aug, '92	1	Bellis, AB	Chauvco Resources Ltd.	Bočna	Vertikalna	31.75	114.3	570
Sep, '92	1	Irricana, AB	PanCanadian Petroleum	Nova	Vertikalna	50.8	121.0	2,100
Oct, '92	1	Canada	Canadian Hunter Ltd.	Bočna	Vertikalna	44.45	98.4	?
Nov, '92	1	Strachan, AB	Gulf Canada Resources Inc.	Bočna	Vertikalna	50.8	152.0	4,000
Jan, '93	1	Algar, AB	Rio Alto Oil & Gas Ltd.	Bočna	Vertikalna	31.75	114.3	455
Feb, '93	1	Medicine Hat, AB	Petro-Canada Ltd.	Bočna	Vertikalna	50.8	104.0	600
Mar, '93	1	Shekille, AB	Petro-Canada Ltd	Nova	Horizontalna	50.8	121.0	1,800
Mar, '93	1	Bellis, AB	Talisman Energy Ltd	Bočna	Vertikalna	38.1	114.3	570
Aug, '93	8	Brooks, AB	PanCanadian Petroleum	Bočna	Vertikalna	31.75	114.3	655
Aug, '93	1	Lovell River, AB	Conoco	Nova	Vertikalna	50.8	121.0	1,750
Oct, '93	1	Wilson Crk, AB	Imperial Oil Resources	Nova	Vertikalna	60.3	156	1,450
Nov, '93	1	Delia, AB	Poco Petroleum Ltd.	Bočna	Vertikalna	50.8	95.2	260
Dec, '93	1	Sincilar, AB	Imperial Oil Resources	Bočna	Vertikalna	60.3	121.0	1,775
Jan, '94	1	Kaybob, AB	Co-enerco	Bočna	Vertikalna	38.1	98.0	1,400
Jan, '94	1	Fox Creek, AB	Amarada	Nova	Vertikalna	50.8	152.0	2,500
Jan, '94	1	Doe Creek, AB	Talisman	Bočna	Vertikalna	50.8	98.0	2,500

4.3.1. Primjer izrade bočne bušotine malog promjera uz korištenje savitljivog tubinga

Najveće alžirsko naftno polje, Hassi Messaoud, otkriveno je 1956. godine i od tada je na njemu izrađeno više od 1 000 bušotina. Polje je podijeljeno na 25 zona, međusobno odvojenih slabopropusnim barijerama, uglavnom rasjedima. Kambrijske strukture ležišta podijeljene su na 4 litološke zone (R3, R2, Ra i Ri). Bušenje u tim zonama predstavlja velike izazove zbog kompleksnih petrofizikalnih svojstava, malog ležišnog tlaka, jako čvrstih i abrazivnih formacija koje su brojnim vertikalnim frakturama povezane s dubljim formacijama što uzrokuje pridobivanje velikih količina slane vode. U ležištu su zabilježena sljedeća početna svojstva: početni ležišni tlak 466,80 bar (6 860 psi), propusnost između 0,5 i 1,0 μm^2 , gustoća pridobivene nafte od 801 kg/m^3 do 808 kg/m^3 (43,7 – 45° API), prosječni plinski faktor (*engl. gas-oil ratio – GOR*) od 200 m^3/m^3 te temperatura od 120 °C. Do 1964. godine ležište je proizvodilo samo režimom otopljenog plina, dok su se kasnije u ležište utiskivali plin i voda kako bi se povećao iscrpak nafte (Bachir et al., 2007).

Ra zona, koja je podijeljena na 5 podsekcija (D1, ID, D2, D3 i D4), ima zabilježena najbolja petrofizikalna svojstva. Unutar podsekcije D4, u bušotini MD-330 uspješno je uz primjenu savitljivog tubinga u uvjetima podtlaka izrađena bočna bušotina malog promjera. Tlak u bušotini iznosio je 381,06 bar (5 600 psi) što je bilo dovoljno da se za bušenje u uvjetima podtlaka koristi nafta pridobivena na polju, gustoće 801 kg/m^3 (45°API) bez potrebe dodavanja plinske faze.

Cilj projekta bio je vratiti i poboljšati pridobivanje ugljikovodika iz postojećih vertikalnih bušotina, bušenjem bočnih bušotina malog promjera. Planirano je bilo izaći iz postojećeg kanala bušotine kroz proizvodni niz zaštitnih cijevi te u uvjetima podtlaka izraditi bočnu bušotinu koja bi zahvatila kambrijske strukture ležišta, prvenstveno zonu Ra. Zona Ra nalazi se na dubini od 3 400 m i većinom sadrži kambrijske pješčenjake koji imaju naglašenu heterogenost petrofizikalnih svojstava.

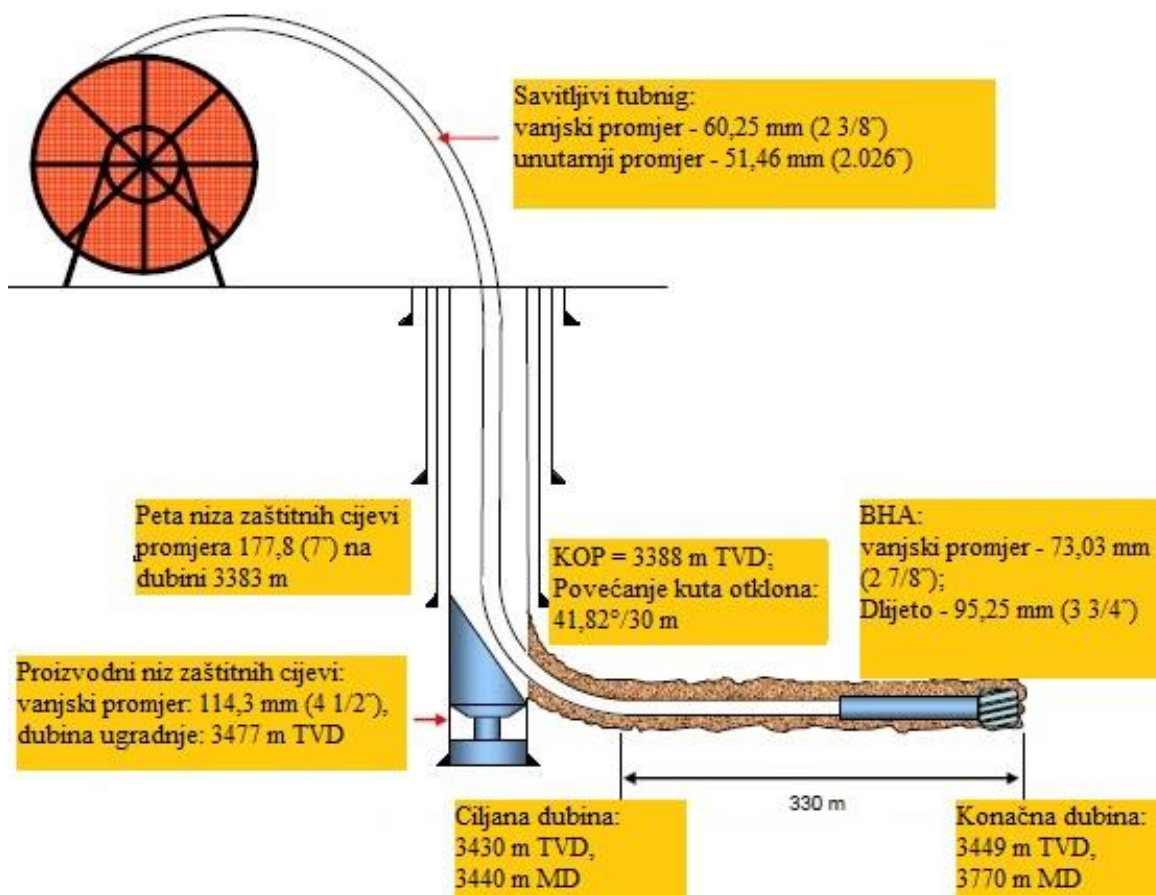
Prije izrade bočne bušotine, bilo je potrebno izraditi otvor kroz proizvodni niz zaštitnih cijevi. Bušotina MD-330 bila je opremljena proizvodnim nizom zaštitnih cijevi vanjskog promjera 114,3 mm (4 ½") do dubine od 3 477 m koji je bio cementiran od dna do vrha. Za izradu otvora korištena je kombinacija klina i sidrenog pakera koji se po spuštanju na željenu dubinu aktivirao i usidrio unutar kolone zaštitnih cijevi. Prije postavljanja klina bilo je potrebno obaviti mjerenja u bušotini kako bi se sidreni paker mogao pravilno orijentirati. Po završetku orijentiranja sidrenog pakera, klin i glodač za početno glodanje zaštitnih cijevi

spušteni su u bušotinu i započelo se s izradom otvora. Otvor je izrađen u jednom manevru primjenom dijamantnog glodača te glodača proširivača.

Nakon izrade otvora u zaštitnim cijevima pristupilo se izradi zakrivljenog dijela bočnog kanala bušotine. Točka skretanja kanala bušotine (KOP) bila je na 3 388 m stvarne vertikalne dubine (*engl. true vertical depth –TVD*) s malim polumjerom zakrivljenosti od $41,82^\circ/30$ m.

Zakrivljena sekcija izrađena je primjenom jednožrvanjskih dlijeta (*engl. monocone bit*) promjera 95,25 mm ($3 \frac{3}{4}$ ""). Sastav alata uključivao je još žiroskop, dubinski motor promjera 79,38 mm ($3 \frac{1}{8}$ "") s mogućnošću postizanja velikog zakretnog momenta uz mali broj okretaja te telemetrijskog sustava koji je bio 4,5 m udaljen od dlijeta. Kako bi se izbjegli mogući problemi, pri izradi zakrivljenog dijela kanala bušotine nisu se primjenjivali uvjeti podtlaka. Po završetku izrade zakrivljenog dijela dosegnuta je ciljana dubina od 3 430 m TVD (3 440 m mjerene dubine (*engl. measured depth –MD*)).

Bočna bušotina dalje je bušena dlijetom istog promjera (95,25 mm), međutim više nisu bila korištena žrvanjska dlijeta, već su se upotrebljavala impregnirana dijamantna dlijeta. Uz dlijeto u sastav krutog alata dodan je dubinski motor promjera 73,03 mm ($2 \frac{7}{8}$ "") s potisnikom (*engl. thruster*). Kruti alat bio je spojen na savitljivi tubing promjera 60,33 mm ($2 \frac{3}{8}$ ""). Konačna postignuta dubina iznosila je 3 770 m MD tj. 3 449 m TVD. Na slici 4-7 prikazana je bušotina MD-330 nakon izrade bočnog kanala bušotine te alat korišten prilikom bušenja.



Slika 4-7. Prikaz bušotine MD-330 prije i nakon bušenja bočne bušotine malog promjera (Bachir et al., 2007)

Bušenje je obavljeno korištenjem nafte proizvedene na polju. Odabrani fluid imao je prednost pred drugim fluidima jer se smatralo da će se njegovim korištenjem pojava oštećenja naslaga svesti na najmanju moguću mjeru. Simulacije bušenja u uvjetima podtlaka s odabranim fluidom su provedene kako bi se osigurala tri ključna parametra (Bachir et al., 2007):

- održavanje uvjeta podtlaka tijekom cijelog procesa bušenja,
- ostvarivanje kvalitetnog čišćenja kanala bušotine u horizontalnom i vertikalnom dijelu i
- održavanje protoka unutar optimalnih granica za rad dubinskih motora.

Pri dimenzioniranju hidrauličkih parametara promatralo se kako promjena dobave sisaljki i promjena tlaka sisaljke utječu na uvjete podtlaka u bušotini. Simulacijama je određeno da je dobava od 350 l/min optimalna kada nema dotoka nafte i plina u bušotini. Za drugi slučaj, koji uključuje dotok nafte i plina u bušotinu, određena je optimalna dobava od 320 l/min.

U horizontalnom dijelu kanala bušotine od velike je važnosti bilo kvalitetno čišćenje. Na temelju simulacija određeno je da je za kvalitetno čišćenje u horizontalnom dijelu kanala bušotine potrebno ostvariti minimalnu brzinu protoka od 65 m/min, dok za vertikalni dio minimalna brzina za kvalitetno čišćenje iznosi 55 m/min. Isto tako za postizanje odgovarajućeg čišćenja preporučeno je uklanjanje isplačnog obloga manevriranjem bušaćim nizom (*engl. wiper trip*) te primjena obroka viskozne isplake za bolje iznošenje krhotina.

Za vrijeme izrade bušotine, brzine protjecanja isplake bile su znatno veće nego li predviđene brzine dobivene simulacijama. U horizontalnom dijelu kanala bile su zabilježene brzine protjecanja od 90 do 100 m/min, dok su se u vertikalnom dijelu brzine protjecanja isplake kretale između 85 i 95 m/min ovisno o primijenjenoj dobavi i dotoku plina u bušotinu. Postignute brzine protjecanja isplake bile su dovoljne za ostvarivanje kvalitetnog čišćenja kanala bušotine.

Prosječna mehanička brzina bušenja (*engl. rate of penetration – ROP*) prilikom izrade bočnog kanala bušotine u uvjetima podtlaka iznosila je 2,0 m/h. Ovim načinom bušenja ostvarena je dvostruko veća brzina bušenja nego primjenom konvencionalnog sklopa alatki pri izradi okolnih bušotina na istom polju.

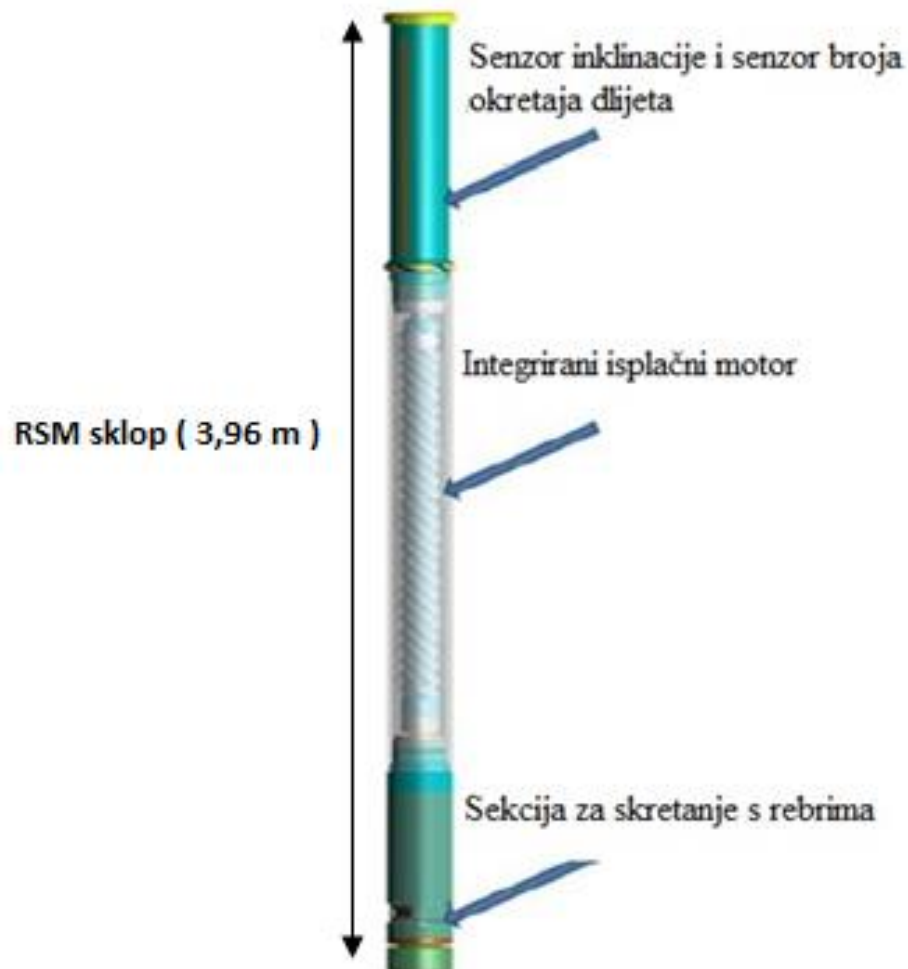
Prilikom izrade horizontalnog dijela kanala bušotine, zabilježeni su dotoci nafte i plina. Prvi dotok nafte zabilježen je 16 m nakon postignute ciljane dubine (3 440 m MD). Do dubine od 3 620 m, prosječna proizvodnja nafte kretala se između 2 i 5 m³/sat. Daljnjim bušenjem proizvodnja se naglo povećala na 10 do 15 m³/sat. Ukupno je za vrijeme izrade bušotine tj. u razdoblju od 20 dana proizvedeno 1 994 m³ (12 540 barela (bbl)) nafte. Prvi znakovi proizvodnje plina zapaženi su na dubini od 3 456 m MD. Isprekidana proizvodnja plina pojavljivala se do 3 643 m MD, u rasponima od 0 do 2 500 m³/dan, a daljnjim napretkom bušenja povećale su se i količine proizvedenog plina koje su se kretale između 5 000 i 18 000 m³/dan. Bušotina MD-330 je po završetku radova bila bušotina s najboljim proizvodnim svojstvima na Hassi Messaoud polju (Bachir et al., 2007).

4.3.2. Izrada bočnih bušotina malog promjera uz primjenu savitljivog tubinga i rib steering motor sklopa

Zbog nemogućnosti rotacije savitljivog tubinga, uvedena je potreba ugradnje dubinskog motora i spojnice za orijentiranje za ostvarivanje rotacije sklopa alatki na dnu bušotine (BHA). Konvencionalni sklop alatki koristio je motore s podesivim zakošenim kućištem prilikom usmjerenog bušenja. Korištenjem konvencionalnih sklopova pri izradi usmjerenih i horizontalnih bušotina mogle su se ostvariti limitirane duljine horizontalnih sekcija. Uz to ovim bi se alatima dobili zavojiti kanali bušotina, ne bi bio ostvaren optimalan prijenos opterećenja na dlijeto te je znalo doći do pojave značajnih vlačnih sila (*engl. drag*) što je u svemu doprinijelo smanjenoj kvaliteti izrađene bušotine (Ross et al., 2012).

Kao što je ranije navedeno u tekstu, savitljivi tubing mora za vrijeme izrade bušotine biti tlačno opterećen kako bi se prenijelo opterećenje na dlijeto. Međutim, premašivanjem kritične tlačne sile doći će prvo do sinusoidalnog izvijanja savitljivog tubinga, a zatim i do spiralnog izvijanja. Spiralnim izvijanjem povećat će se kontakt savitljivog tubinga sa stijenkama kanala bušotine što će dovesti do pojave trenja i mogućeg uklinjenja savitljivog tubinga. Kako bi se povećalo opterećenje koje se prenosi na dlijeto potrebno je smanjiti trenje u kanalu bušotine. Prvi preduvjet za smanjenje trenja u bušotini je ostvarivanje kvalitetnog čišćenja kanala bušotine. Kako je tijekom bušenja uz primjenu savitljivog tubinga nemoguće ostvariti rotaciju savitljivog tubinga, izrada horizontalnih i usmjerenih sekcija moguća je samo orijentacijskim ili kliznim načinom bušenja (*engl. oriented, sliding mode*). Kao posljedica toga, pri bušenju u horizontalnoj sekciji potrebno je stalno korigirati orijentaciju dlijeta u bušotini kako bi se nastavilo bušiti u željenom smjeru. Brojne korekcije smjera dlijeta u bušotini pridonijeti će zavojitosti kanala bušotine, što će povećati vlačnu silu i smanjiti prijenos opterećenja na dlijeto. Smanjenjem korekcija orijentacije dlijeta u bušotini, smanjila bi se zavojitost kanala bušotine, smanjilo bi se i trenje u bušotini, a time bi bio omogućen prijenos većeg opterećenja na dlijeto i bila bi omogućena izrada duljih horizontalnih sekcija (Kozlov et al., 2010).

Izazov povećanja primjene bušenja uz upotrebu savitljivog tubinga, doveo je do razvoja motora s mogućnošću skretanja kanala bušotine primjenom „rebara“ ugrađenih na kućište motora (*engl. rib-steering motors – RSM*). RSM sklop zapravo objedinjuje uronjeni motor i spojnicu za orijentiranje u jedan sklop (slika 4-8).



Slika 4-8. Sastav RSM sklopa (Ross et al., 2012)

Za ostvarivanje zakretanja kanala bušotine primjenjuju se tri hidraulički aktivirana rebra koja se kontroliraju s površine. RSM sklop sastoji se od nekoliko bitnih komponenti. Od dna prema vrhu sastav RSM sklopa je sljedeći (Ross et al., 2012) (slika 4-8):

- sekcija za skretanje kanala bušotine s tri rebra nalik na papuče kod rotirajućeg upravljivog sustava (*engl. rotary steerable system – RSS*) (slika 4-9),
- integrirani uronjeni motor (*engl. integrated mud-motor*),
- senzor inklinacije u blizini dlijeta (*engl. near-bit inclination sensor*) i senzor broja okretaja dlijeta (*engl. revolutions per minute (RPM) sensor*).

RSM sklop se ugrađuje odmah iza dlijeta. Duljina sklopa alatki na dnu bušotine (BHA) primjenom RSM sklopa smanjena je za otprilike 1,5 m, odnosno s 5,49 m (18 ft) kolika je prosječna duljina uz primjenu uronjenog motora s podesivim zakošenim kućištem, na 3,96 m (13 ft) uz primjenu RSM sklopa.



Slika 4-9. Stvarni i shematski prikaz rebara RSM sklopa (Ross et al., 2012)

RSM sklop ima 4 načina djelovanja:

1. djelovanje s neaktiviranim rebrima (*engl. ribs off mode*) – sva tri rebra su neaktivna te se na taj način smanjuje promjer RSM sustava kako bi se izbjeglo neželjeno skretanje alatki na dnu. Ovaj način se uglavnom primjenjuje prilikom spuštanja i vađenja alata;
2. način održavanja kuta otklona (*engl. inclination hold mode*) – rebra za skretanje automatski se aktiviraju i deaktiviraju za održavanje željenog kuta otklona kanala bušotine;
3. način skretanja kanala bušotine (*engl. steer mode*) – kontrola rada rebara bazirana je na unesenom azimutu i kutu otklona, a unutarnji algoritmi omogućavaju izvlačenje i uvlačenje rebara kako bi se osigurala izrada kvalitetnog kanala bušotine do unesenih koordinata;
4. način centriranja (*engl. center mode*) – pri ovom načinu djelovanja, RSM sklop se koristi kao dodatni stabilizator.

Prvi RSM sklop bio je izrađena u promjeru od 76,2 mm (3") te je bio pogodan za izradu bušotina promjera 88,9 mm (3 ½"), pa sve do 120,65 mm (4 ¾"). Ovim sklopom moguće je izraditi usmjerene sekcije kanala bušotina s povećanjem kuta otklona od 10°/100 m, iako je u nekim bušotinama ostvareno povećanje kuta otklona i do 14°/100 m.

4.3.2.1. Primjer korištenja RSM sklopa pri izradi bočnih bušotina malog promjera uz upotrebu savitljivog tubinga

U sljedećem primjeru opisana je izrada triju bočnih kanala na najvećem naftnom polju na Aljasci. Na naftnom polju Prudhoe Bay većina bušotina je izrađena tijekom 1980-ih godina pa je sredinom 2000-ih godina pridobivanje iz tih bušotina smanjeno, a kako su u ležištu većinom homogenizirana svojstva, ono je idealno za izradu bočnih bušotina i pri tome primjenu novih tehnologija kao što je RSM sklop (Kozlov et al., 2010).

U promatranoj bušotini izrađena su, iz glavnog kanala, tri bočna kanala. Prvi kanal izrađen je konvencionalnim sklopom alatki koji je uključivao korištenje uronjenog motora s podesivim zakošenim kućištem, dok su druga dva bočna kanala izrađena upotrebom RSM sklopa.

Usmjerena sekcija prvog bočnog kanala bušotine izrađena je primjenom uronjenog motora. Duljina usmjerene sekcije iznosila je 277,98 m (912 ft), s povećanjem kuta otklona od 23°/30,48 m (23°/100 ft) do postizanja ciljane dubine. Kako RSM sklop nije bio dostupan za daljnje bušenje, donesena je odluka o nastavku bušenja primjenom konvencionalnog uronjenog motora. Nakon bušenja 212,45 m (697 ft) prosječnom mehaničkom brzinom bušenja od 26,52 m/sat (87 ft/sat), alat je izvučen iz bušotine zbog nedovoljnog prijenosa opterećenja na dlijeto te je postojeći sklop zamijenjen sklopom koji je uključivao motor s podesivim zakošenim kućištem. Tim sklopom dovršena je izrada bušotine do konačne dubine od 4 354,07 m MD (14 285 ft). Izrađena je bočna sekcija duljine 558,39 m (1 832 ft), s povećanjem kuta otklona od 10°/30,48 m. Daljnje bušenje je obustavljeno jer se proizvodni lajner nije mogao ugraditi do konačne dubine bušotine tj. zato što se bušotina nije mogla uspješno proizvodno opremiti.

Bušenje usmjerene sekcije drugog kanala bušotine započelo je na 3 546,96 m MD (11 637 ft) prve bušotine. Usmjerena sekcija iznosila je ukupno 179,52 m (589 ft) s prosječnim povećanjem kuta otklona od 30°/30,48 m. Sekcija je izrađena koristeći konvencionalni uronjeni motor. Bočna bušotina dalje je bušena uz primjenu RSM sklopa te je u konačnici u jednom manevru izbušena sekcija duljine 660,20 m (2 166 ft) prosječnom brzinom bušenja

od 25,33 m/sat, dok je prosječno povećanje kuta otklona iznosilo $4,9^{\circ}/30,48$ m. Konačna postignuta dubina bušotine iznosila je 4 386,68 m MD (14 392 ft).

Bušenje treće usmjerene sekcije započelo je na 3 529,58 m MD (11 580 ft) prve bušotine. Ostvareno je povećanje kuta otklona od $31^{\circ}/30,48$ m te je duljina usmjerenog dijela kanala iznosila 158,80 m (521 ft). RSM sklop korišten je za izradu lateralnog dijela bušotine u duljini od 637,03 m (2 090 ft) u jednom manevru. Prosječna brzina bušenja iznosila je 27,40 m/sat. Ukupna duljina treće bušotine iznosila je 4 325,42 m MD (14 191 ft), a prosječno povećanje kuta otklona lateralne sekcije $4,7^{\circ}/30,48$ m.

Obje bočne bušotine izrađene uz pomoć RSM sklopa kasnije su opremljene proizvodnim lajnerom koji je u oba slučaja ugrađen do konačne mjerene dubine bušotine (Ross et al., 2012).

5. PRIMJERI BOČNIH BUŠOTINA MALOG PROMJERA NA PLINSKOM POLJU MOLVE

Plinsko polje Molve nalazi se u području dravske potoline, u Koprivničko-križevačkoj županiji. Polje je otkriveno 1974. godine i u fazi istraživanja koja je trajala do 1979. godine izrađeno je 8 bušotina (Mol-1 do Mol-8). Ukupno je na polju do 2015. godine izrađeno 45 kanala bušotina, u nekoliko faza razrade ležišta (slika 5-1). Maksimalna dnevna proizvodnja na polju Molve zabilježena je 1995. godine kada su zabilježeni sljedeći podaci (PRP – INA, 2015):

- dnevno pridobivanje plina: $Q_{\text{plin}} = 4,32 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{dan}$
- dnevno pridobivanje kondenzata: $Q_{\text{kond}} = 310 \text{ m}^3/\text{dan}$
- dnevno pridobivanje vode: $Q_{\text{voda}} = 340 \text{ m}^3/\text{dan}$.

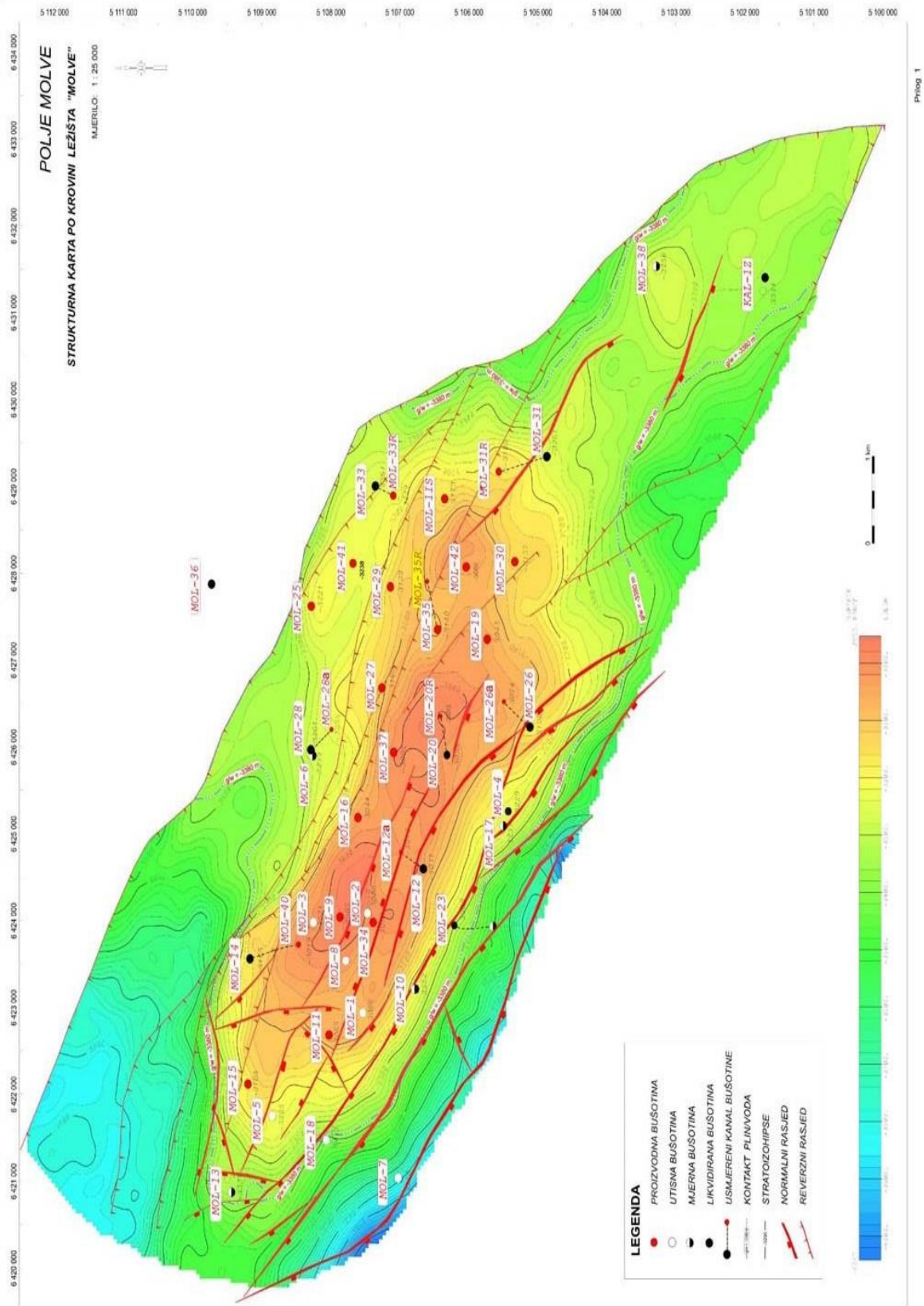
5.1. Bušotina Molve-35

Eksploatacijska bušotina Molve-35 (Mol-35) bušena je na plinskom polju Molve 1989. godine, u sklopu druge faze razrade polja, do konačne dubine od 3 600 metara. Nakon redovnog godišnjeg remonta postrojenja CPS Molve III u rujnu 2010. godine, došlo je do zavodnjavanja bušotine Mol-35. Prije zatvaranja bušotine zbog remonta postrojenja, zabilježeni su sljedeći parametri:

- $p_t = 64 \text{ bar}$
- $Q_{\text{plin}} = 104\,500 \text{ m}^3/\text{dan}$
- $Q_{\text{kond}} = 6,9 \text{ m}^3/\text{dan}$
- $Q_{\text{voda}} = 56 \text{ m}^3/\text{dan}$.

Bušotinom Mol-35, ukupno je do zatvaranja pridobiveno $Q_{\text{plin}} = 1\,596\,545\,800 \text{ m}^3$ i $Q_{\text{kond}} = 81\,563 \text{ m}^3$. Budući da je analizom utvrđeno zavodnjavanje svih proizvodnih intervala bušotine Mol-35, pristupilo se izradi projekta bočne bušotine Mol-35R kako bi se nadomjestili gubici proizvodnih količina. Za izradu bočne bušotine Mol-35R bilo je potrebno izvršiti odgovarajuće remontne radove u bušotini Mol-35 tijekom kojih je izvedena proba primanja (*engl. step-rate test*), izvađena proizvodna oprema, provjerena kvaliteta cementne veze u zoni otvaranja prozora (KOP (*engl. kick of point*) = 2 210 m) te zatvoren stari kanal postavljanjem cementnog čepa do 2 915,88 m, a remontni radovi završili su

postavljanjem mehaničkog čepa na 2 206 m, ispitivanjem hermetičnosti i zatvaranjem ušća (PRP – INA, 2015).

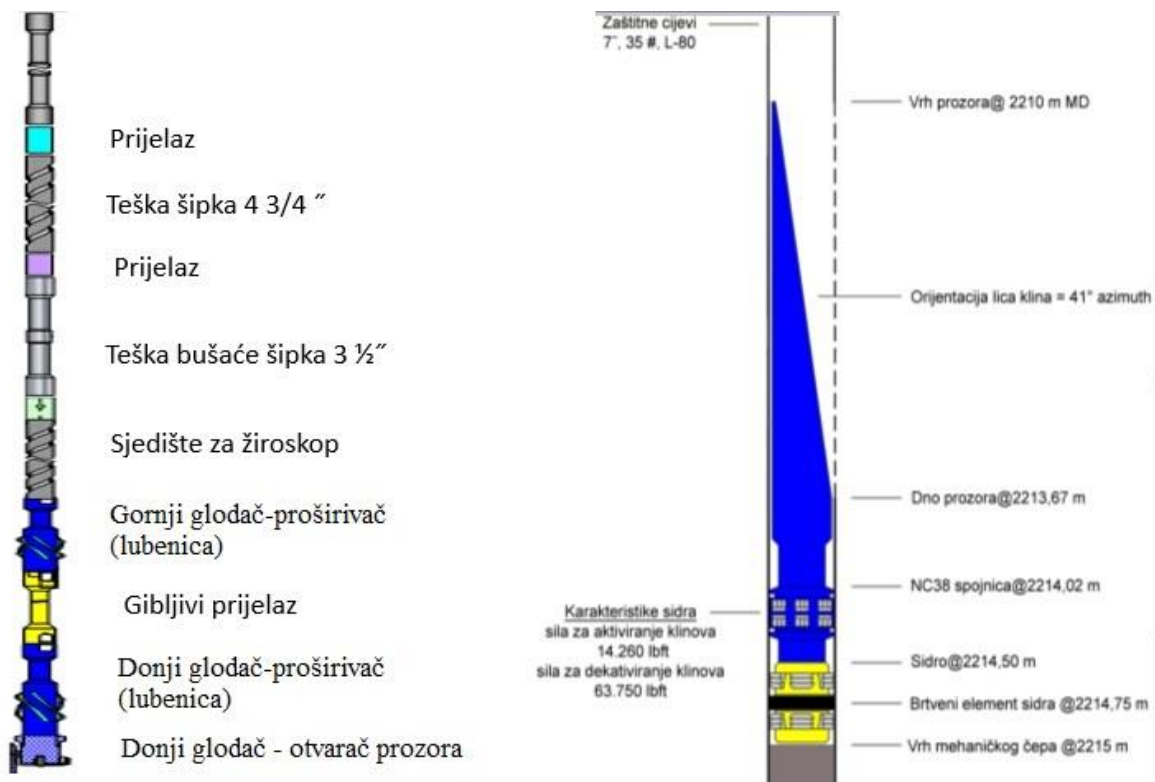


Slika 5-1. Strukturna karta po krovini ležišta Molve (PRP – INA, 2015)

5.2. Bušotina Molve-35R

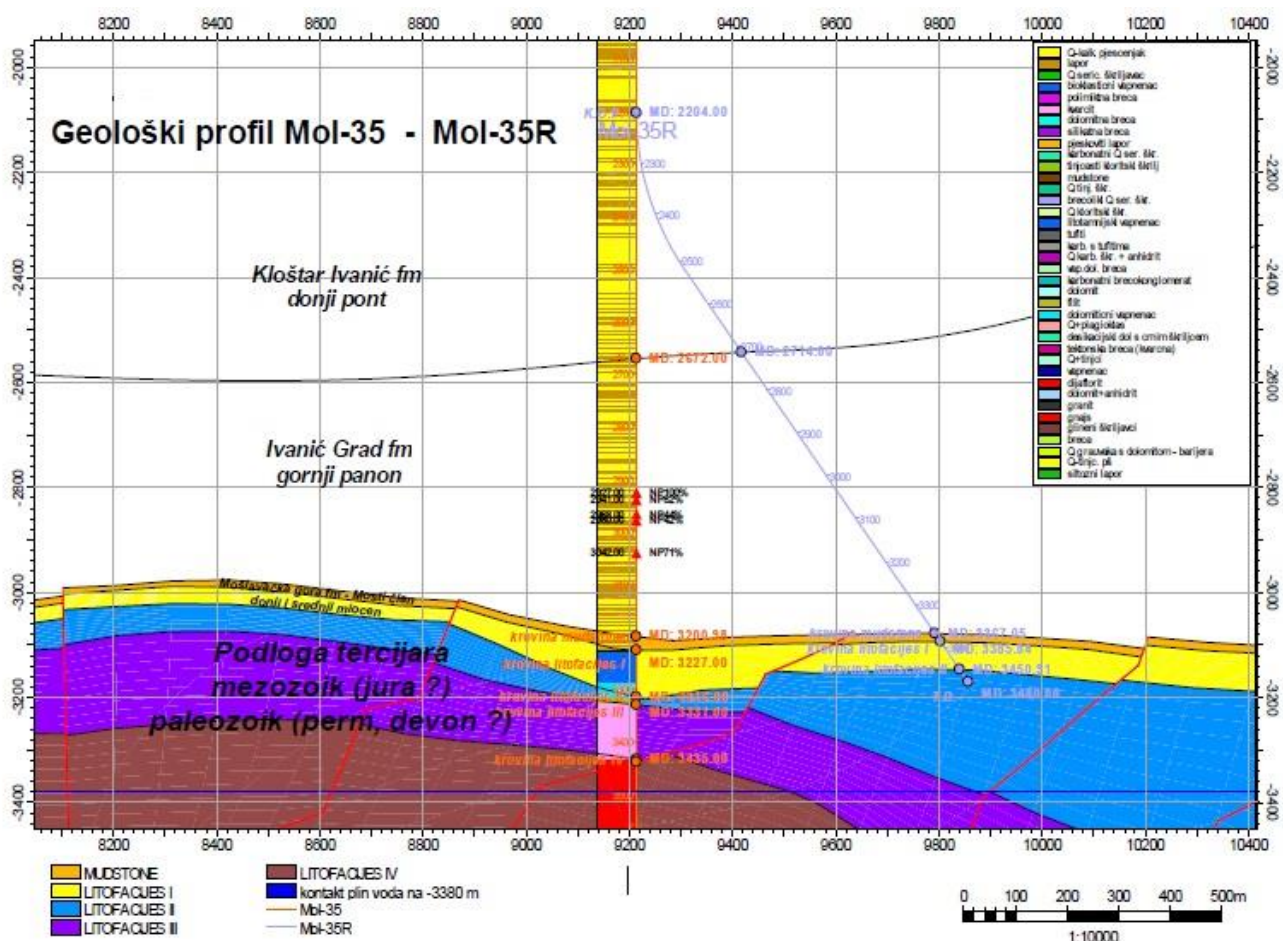
Bušotina Mol-35R koso je usmjerena bočna bušotina koja je vezana na postojeću vertikalnu bušotinu Mol-35. Bušotina je usmjerena prema sjeveroistoku s očekivanim ulazom u ležište u zoni iza prvog od niza reverznih rasjeda koji presijecaju sjeverno krilo antiklinale Molve u kojem prevladavaju biogeni vapnenci miocenske starosti iz kojih proizvodi većina bušotina na polju, uključujući najizdašnije bušotine Mol-27 i Mol-11.

Otvaranje prozora za izradu bočne bušotine obavljeno je ugradnjom klina s tri glodača (slika 5-2) na dubini od 2 210 m, kroz dvije kolone zaštitnih cijevi: 2. tehničku kolonu promjera 244,48 mm (9 5/8") i proizvodnu kolonu promjera 177,8 mm (7").



Slika 5-2. Klin za skretanje i niz tri glodača za otvaranje prozora (Lelak, 2017)

Usmjereni kanal bušotine izrađen je u azimutu od 75,20°, s inklinacijom od 36°, dlijetom promjera 149,23 mm (5 7/8") do dubine od 3 381 m tj. do stvarne vertikalne dubine (*engl. True vertical depth – TVD*) od 3 203 m te se smatralo da se dno bušotine nalazi neposredno iznad očekivane krovine ležišta na 3 385,9 m (TVD = 3 210,3 m) (slika 5-3).



Slika 5-3. Geološki profil bušotine Mol-35 i projektirani profil bušotine Mol-35R (PRP-INA, 2015)

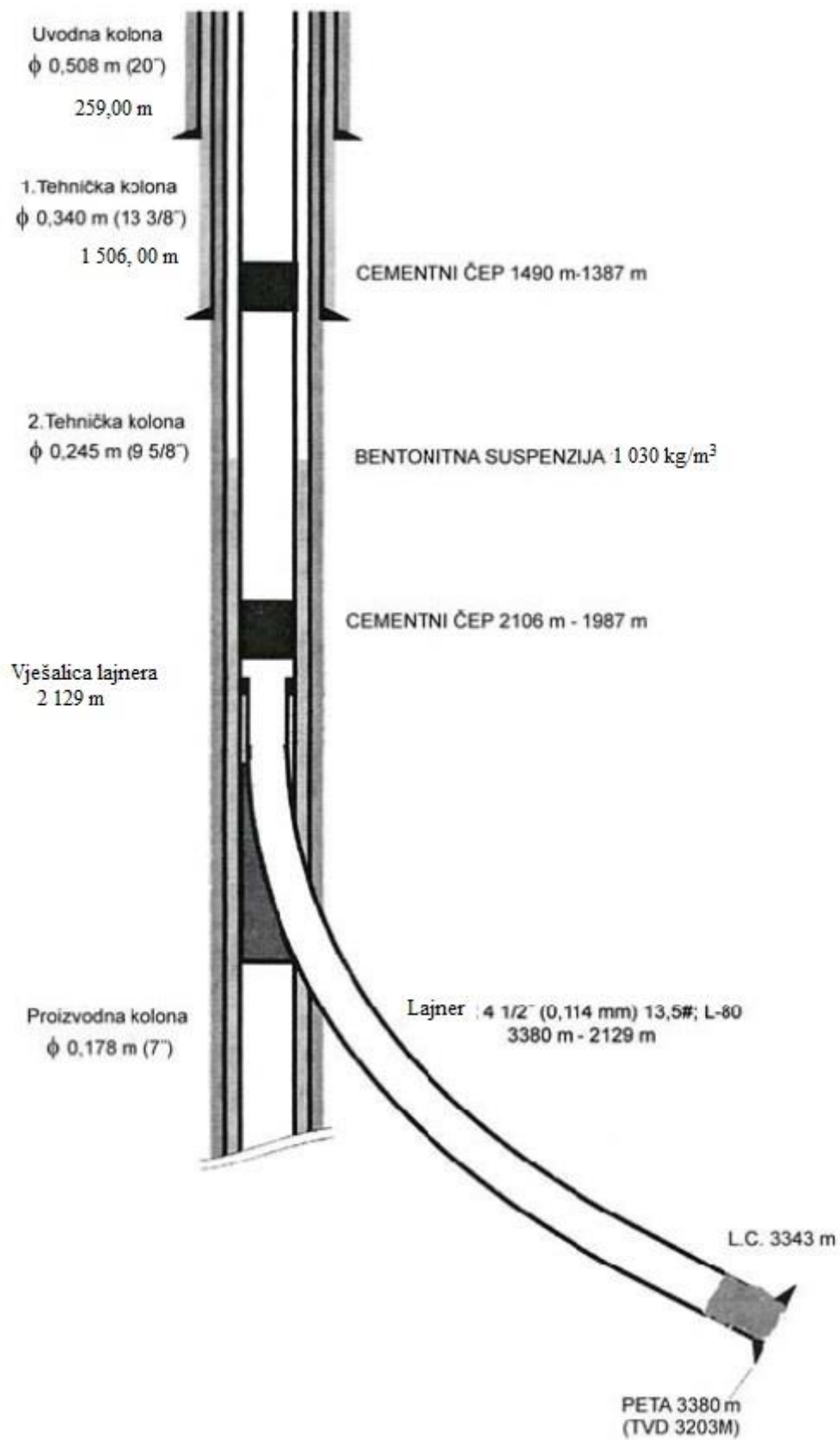
Bušotina je dalje zacijevljena ugradnjom lajnera promjera 114,3 mm (4 1/2"; 13,5#, L-80 VAGT) do dubine 3 380 m, s vješalicom na 2 129 m), a lajner je nakon ugradnje cementiran do vrha vješalice. Nastavak bušenja trebao je biti obavljen dlijetom promjera 95,25 mm (3 3/4") kojim bi se obuhvatio ležišni litofacijes I (biokalkarenit) u duljini od 65 metara te dio ležišnog litofacijesa II (breče) u duljini od 31 m do konačne dubine 3 480 m tj. 3 287,7 m TVD. Planirani početak pridobivanja bušotine trebao je biti početkom veljače 2013. godine. Međutim, zbog neriješenih imovinsko-pravnih odnosa, krajem listopada 2012. godine, zabranjeno je daljnje bušenje i bušotina je privremeno napuštena postavljenjem cementnih

mostova unutar proizvodne kolone promjera 177,8 mm (7") na dubinama od 2 106 – 1 987 m te 1 490 – 1 387 m te je u bušotini ostavljena bentonitna suspenzija gustoće 1 030 kg/m³ (slika 5-4) (PRP – INA, 2015; Vukobratović et al. 2016).

U tablici 5-1 prikazan je status bušotine nakon napuštanja.

Tablica 5-1. Status bušotine Molve-35R nakon napuštanja (PRP-INA, 2015)

Bušotina Molve-35R	Dubina: 3600,0 m		Status: Plinska eksploatacijska	
	Kolona	Promjer	Dubina ugradnje	Visina podizanja cementne kaše
Zacjevljenje	Uvodna kolona	508,8 mm (20")	259,0 m	Zacementirana do ušća
	I tehnička kolona	339,7 mm (13 3/8")	1 506,0 m	Zacementirana do ušća
	II tehnička kolona	244,5 mm (9 5/8")	3 215,5 m	Zacementirana do ušća
	Proizvodna kolona	177,8 mm (7") 35 #	3 529,7 m	Zacementirana do ušća
	Proizvodni lajner	114,3 mm (4 1/2"), 13,5 #	2 129 – 3 380 m	Zacementirana do vrha vješalice (2 129 m)
Fluid: Bentonitna suspenzija gustoće 1 030 kg/m ³				
Oprema: Bez ugrađene opreme; ugrađeni cementni čepovi u intervalima 1 387 m – 1 490 m i 2 106 m – 1 977 m				



Slika 5-4. Stanje bušotine Mol-35R nakon napuštanja (PRP-INA, 2015)

5.3. Nastavak bušenja na bušotini Mol-35R

Rješenjem imovinsko-pravnih odnosa, ponovno su započeti radovi na bušotini Mol-35R. Kako je za vrijeme napuštanja bušotine došlo do promjene ležišnih uvjeta i do povećanja udjela vode na okolnim bušotinama, odlučeno je da se konačna dubina bušotine Mol-35R smanji za 40 m tj. da konačna mjerena dubina bude 3 440 m (TVD=3 256 m). Ovim skraćanjem kanala bušotine spriječio se ulazak u litofacijes II (breče) u kojem je postojala mogućnost većeg povlačenja i pridobivanja vode.

Nastavak bušenja obavljen je postrojenjem National-402, čiji je transport iz industrijskog kruga Crosco do lokacije bušotine započeo 11.4.2016. te završen u roku od 7 dana. Nakon petodnevne montaže postrojenja pristupilo se funkcionalnom ispitivanju samog postrojenja. Provjeravani su tlakovi u prstenastim prostorima te statički nivo u bušotini, brtveni sklop proizvodne kolone promjera 177,8 mm (7") te je na koncu obavljena zamjena erupcijskog uređaja preventerskim sklopom 7 1/16" 10M (anularni i čeljusni preventer tipa Cameron) i ugrađen je sigurnosni ventil (*engl. check*) u vješalicu tubinga.

Nakon završetka svih pripremnih radova, sastavljanjem alata za bušenje cementnih čepova pristupilo se radovima u samoj bušotini. Cementni čepovi postavljeni unutar proizvodne kolone 177,8 mm (7") izbušeni su korištenim dlijetom promjera 149,2 mm (5 7/8"), a osim dlijeta kruti alat (*engl. bottomhole assembly – BHA*) činilo je i 18 komada teških bušaćih šipki promjera 88,9 mm (3 1/2") x 52,39 mm (2 1/16") te bušaće šipke promjera 88,9 mm (3 1/2"), 13,3#, G-105. Bentonitna suspenzija gustoće 1 030 kg/m³ zamijenjena je isplakom gustoće 1 040 kg/m³. Prvi cementni čep (1 387-1 490 m) izbušen je za 17 sati, a tijekom njegovog bušenja došlo je do pjenjenja isplake te je 50 m³ odbačeno i zamijenjeno vodom. Drugi cementni čep (1 987-2 106 m) potvrđen je nasjedom od 3 tone i izbušen za 9 sati. Vrh vješalice lajnera potvrđen je nasjedanjem na dubini 2 129 m.

Bušaći alat je potom izvađen i zamijenjen alatom za bušenje protupovratnog ventila i cementa unutar lajnera promjera 114,3 (4 1/2"). Niz se sastojao od jednožrvanjskog dlijeta (*engl. monocone bit*) promjera 95,25 mm (3 3/4") (slika 5-5), bez mlaznica, spušenom na kombiniranom nizu bušaćih šipki: 60,3 mm (2 3/8", 6,65#) duljine od oko 1 350 m i 88,9 mm (3 1/2", 13,3#, G-105). Protupovratni ventil potvrđen je spuštanjem niza i nasjedanjem na dubini od 3 344 m. Nakon bušenja protupovratnog ventila izbušen je i cementni kamen unutar lajnera do dubine od 3 375 m, što je 5 m iznad pete lajnera. Dlijeto je nakon bušenja zadignuto u razinu vješalice lajnera i bušotina je isprana. Nakon toga se zatvaranjem

preventera oko bušaćih šipki promjera 88,9 mm (3 ½") ispitana hermetičnost vrha lajnera te kolona zaštitnih cijevi promjera 114,3 mm (4 ½") i 177,8 mm (7") pri tlaku od 20 MPa.

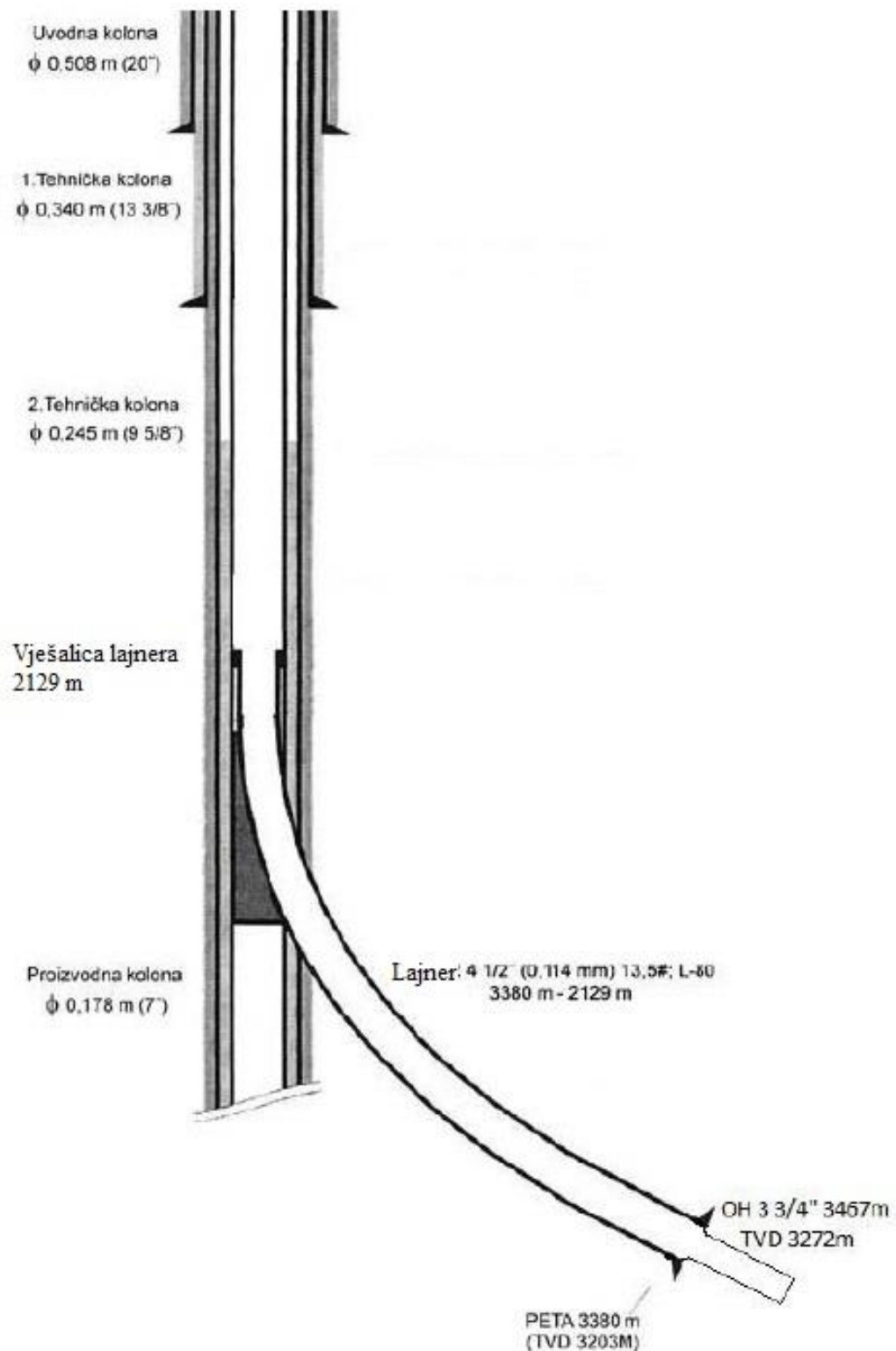


Slika 5-5. Jednožrvanjsko dlijeto promjera 95,25 mm (3 ¾") korišteno za bušenje otvorenog kanala (Lelak, 2017)

Po završetku provjere hermetičnosti alat je izvađen iz bušotine te su slijedila elektrokarotazna mjerenja koja su uključivala: temperaturna mjerenja (*engl. temperature log – T*), provjeru kvalitete cementne veze iza kolone zaštitnih cijevi (*engl. radial incremented bond – RIB*), mjerenja radioaktivnosti tj. gama karotažu (*engl. gamma-ray logging – GR*) i karotažu spojnica zaštitnih cijevi (*engl. casing-collar log – CCL*).

Zamjenom istrošenog dlijeta novim jednožrvanjskim dlijetom i spuštanjem niza do 3 375 m te zamjenom bentonitne suspenzije gustoće 1 030 kg/m³, KCl drill-in isplakom gustoće 1 040 kg/m³ započinje izrada otvorenog dijela kanala bušotine Mol-35R. Prvotno je izbušena peta lajnera i formacija do dubine 3 384 m, nakon čega je uslijedila kontrola statičkog nivoa. Utvrđeno je da je bušotina mirna i nastavljeno je bušenje formacije. Prema podacima dobivenim geološkim praćenjem uočen je ulazak u ležište na mjerenoj dubini od 3 417 m (TVD=3 231,8 m) što je za otprilike 31 m (21,5 m TVD) dublje od očekivanog ulaska. Zbog dubljeg ulaska u ležište i zbog nepoklapanja dobivenih rezultata praćenih parametara u

krovinskom dijelu ležišta bušenje je nastavljeno do konačne mjerene dubine od 3 467m (TVD=3 272,25 m), ali tim produljenjem nije se ušlo u zonu lifotacijesa II (slika 5-6).



Slika 5-6. Prikaz konačnog izgleda bušotine Mol-35R (PRP-INA, 2015)

Nakon dosezanja konačne dubine, bušaći niz izvučen je na površinu te su obavljena elektrokarotazna mjerenja (GR i CCL), ali zbog nasjedanja i natega prilikom izvlačenja sonde samo do 3 433 m. U tablici 5-2 prikazana su svojstva isplake korištene za izradu otvorenog dijela kanala bušotine (PRP-INA, 2015; Biletić et al., 2016).

Tablica 5-2. Svojstva isplake korištene za izradu otvorenog dijela kanala bušotine (3 380 – 3 440 m) (Biletić et al., 2016)

Svojstva isplake			
Gustoća	1 040 kg/m ³	Čvrstoća 10 min gela (Pa)	2 – 3
Plastična viskoznost (mPa•s)	Što niža/(9 – 14)	Debljina isplačnog obloga (mm)	0,5
Naprezanje pri pokretanju (Pa)	5,5 – 6,5	API filtracija (cm³/30min)	< 7
Čvrstoća 10 s gela (Pa)	2	pH	9,11 – 9,84

U tablici 5-3 prikazani su podaci o korištenim dlijetima, a u tablici 5-4 sastav krutog alata korišten prilikom nastavka radova u bušotini Mol-35R.

Tablica 5-3. Dlijeta korištena za nastavak bušenja kanala bušotine Mol-35R (Biletić et al., 2016)

Lista dlijeta korištenih za nastavak bušenja kanala bušotine Mol-35R							
Br.	OD (mm)	Broj spuštanja	Tip	Mlaznice	IADC	Serijski broj	Dubina vađenja dlijeta (m)
1	149,23 mm (5 7/8")	1	SS4LSP	/	217	CH565	2092
2	95,25 mm (3 3/4")	1	B15LRGSP	/	437	CJ139	3375
3	95,25 mm (3 3/4")	2	B15LRGSP	/	437	CJ39	3430
4	95,25 mm (3 3/4")	2	B15LRGSP	/	437	CJ141	3467
Nastavak							
Br.	Izbušeno metara	Sati	Mehanička brzina bušenja (m/h)	WOB (t)	RPM (o/min)	Otklon kanala bušotine (°)	Napomena
1	219	30,5	7,2	1 do 3	50-60	0	cement, čepovi
2	31	9,5	3,3	1 do 2	60	36	PPV, cement
3	55	35,5	1,5	1 do 5	50	36	cement, pet, lapor, vapnenački lapor, pješćenjak, laporoviti vapnenac, vapnenac
4	37	31,0	1,2	1 do 4	50	36	vapnenac, dolomitični vapnenac, oštećenje otvora za mlaznicu

Tablica 5-4. Sastav krutog alata korištenog za nastavak bušenja kanala bušotine Mol-35R
(Biletić et al., 2016)

Datum	Promjer dlijeta/Ser.Br./ Tip/Proizvođač/IADC/Broj spuštanja	Dubina spuštanja (m)	Dubina vađenja (m)/ radnja	Sastav krutog alata		
				BHA	Vanjski promjer (inch)	Duljina (m)
24.04.- 26.04.2016.	5 7/8" /CH565/SS4LSP/ RBI/217/1	1387(CČ)	2129 m / Bušenje cementnih čepova	Dlijeto	5 7/8"	0,18
				Prijelazni komad	3 1/2"	0,57
				TBŠ	3 1/2"	167,4
27.04.- 28.04.2016.	3 3/4" /CJ139/B15LRGSP/RBI/437/1	3344 (PPV)	3375 m / <i>Bušenje (pročišćav anje)</i>	Dlijeto	3 3/4"	0,16
				Prijelazni komad	3 1/2"	1,08
				BŠ	2 3/8"	1312,6
29.04.- 02.05.2016.	3 3/4" /CJ139/B15LRGSP/RBI/437/2	3375 (PETA)	3430 m / <i>Bušenje</i>	Dlijeto	3 3/4"	0,16
				Prijelazni komad	3 1/2"	1,08
				BŠ	2 3/8"	1407,1
				Prijelazni komad	3 1/2"	1,08
				BŠ	3 1/2"	
02.05.- 05.05.2016.	3 3/4" /CJ141/B15LRGSP/RBI/437/1	3430	3467 m / <i>Bušenje</i>	Dlijeto	3 3/4"	0,16
				Prijelazni komad	3 1/2"	1,08
				BŠ	2 3/8"	1407,1
				Prijelazni komad	3 1/2"	1,08
				BŠ	3 1/2"	
05.05.- 11.05.2016.	/	/	/	Tubing+ vodilica	2 7/8"	11,31
				Tubing + prijelazni komadi	2 7/8"	11,66
				Paker	4 1/2"	1,17
				Setting tool	4 1/2"	3,01
				Tubing (13% Cr)	2 7/8"	

6. ZAKLJUČAK

Izrada bočnih bušotina malog promjera značajnije se koristiti zadnjih 25 godina prvenstveno u starijim bušotinama gdje je došlo do smanjenja proizvodnje. U svijetu se najčešće za izradu takvih bušotina koristi savitljivi tubing. Savitljivi tubing se u prošlosti uglavnom primjenjivao u svrhu izvođenja stimulacijskih i remontnih radova u bušotinama, a kasnije se počeo koristiti i kod bušenja. Prvenstveno je korišten u Sjedinjenim Američkim Državama na naftnim poljima na Aljasci, u Kanadi na naftnim poljima u Alberti, a kasnije se njegova primjena proširila po cijelom svijetu. U počecima primjene savitljivog tubinga za bušenje bočnih bušotina malog promjera nailazilo se na mnoge probleme pri izradi bušotine zbog nepouzdanosti i nepoznavanja tehnologije tako da se prvim pokušajima bušenja nije uvijek ostvarivala ušteda. Međutim napretkom tehnologije omogućena je primjena savitljivog tubinga uz ostvarivanje značajnih ušteda u odnosu na konvencionalne sklopove alatki. Najznačajniji napreci ostvareni su u razvoju motora i telemetrijske opreme. Primjenom novih telemetrijskih sklopova podaci koji su se pratili u bušotini puno su točniji pa je tako smanjena mogućnost pogrešaka prilikom bušenja, a razvojem dubinskih motora omogućena je izrada duljih kanala bušotine u kraćem vremenskom periodu. Također, u svrhu smanjenja pogrešaka i boljeg poznavanja uvjeta koji se očekuju u bušotini, u današnje vrijeme se u pripremi izrade bočne bušotina malog promjera uvelike koriste simulacijski programi. Korištenjem tih programa osoblje će dobiti informacije o idealnim vrijednostima parametara bušenja i svojstvima isplake (npr. gustoća isplake, dobava, brzine protoka isplake u određenoj sekciji kanala bušotine za kvalitetno čišćenje itd.) za ostvarivanje što boljih rezultata prilikom bušenja.

Na prikazanom primjeru bušotine Molve-35R vidljivo je da se primjenom konvencionalnog sklopa alatki za izradu bočnih bušotina malog promjera može izraditi bušotina bez ikakvih poteškoća.

Daljnijim razvojem površinskih sklopova i dubinske opreme za izradu bočnih bušotina malog promjera pomaknut će se danas poznate granice pa će i primjena te tehnologije ostvariti još veći uspjeh i još veću primjenu u naftnoj industriji.

7. LITERATURA

1. BACHIR, B.A., FERHAT, A., QUTOB, H., 2007. Successful Application of Underbalanced Coiled-Tubing Drilling in Horizontal Short-Radius Re-entry Well in Hassi Messaoud, Algeria, SPE 106907, SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, SAD, 20-21 March 2007.
2. BILETIĆ, M., TURČINEC, M., ŠPANIĆ, I., HODAK, M., 2016. Završno izvješće za razradnu bušotinu Molve-35R (nastavak). Tehničko-tehnološka dokumentacija tvrtke INA, d.d. Zagreb.
3. GAURINA-MEĐIMUREC, N., 2015. Nastavni materijali iz kolegija Bušenje 2, Ak. god. 2014/2015. Rudarsko-geološko naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
4. GOLUB, S., 2005. Izrada bušotina malog promjera, Diplomski rad. Zagreb, Arhiva knjižnice Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta.
5. HATALA, R., OLASON, M., DAVIS, P., 1995. Canadian Coiled Tubing Horizontal Drilling: Technology and Applications, The Journal of Canadian Petroleum Technology, Volume 34, No. 6, str. 22-29.
6. HEATON, M., ROTEL, W., 1990. Medium-radius lateral drilling application in Canada, The Journal of Canadian Petroleum Technology, Volume 29, No. 3, str. 36-40.
7. HERAKOVIĆ, M., 2003. Pregled bočnih (re-entry) bušotina izrađenih na plinsko-kondenzatnom polju Kalinovac, Diplomski rad. Zagreb, Arhiva knjižnice Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta.
8. HILL, D., NEME, E., EHLIG-ECONOMIDES, C., MOLLINEDO, M., 1996. Reentry Drilling Gives New Life to Aging Fields, Schlumberger Oilfield Review, str. 4-17.

9. INA, 2015. Pojednostavljeni rudarski projekt izrade bočnog kanala eksploatacijske bušotine Mol-35R na eksploatacijskom polju ugljikovodika „Molve“. Tehničko-tehnološka dokumentacija tvrtke INA, d.d. Zagreb.
10. JOSHI, S. D., 1991. Horizontal Well Technology. Tulsa, Oklahoma, SAD: PennWell Publishing Company.
11. KOZLOV, A., FRANTZEN, S., GORGES, T., 2010. Next Generation Technologies for Underbalanced Coil Tubing Drilling, SPE 132084, SPE Deep Gas Conference and Exhibition, Manama, Bahrain, 24-26 January 2010.
12. LELAK, S., 2016. Pojednostavljeni rudarski projekt izrade bočnog kanala eksploatacijske bušotine Mol-35R na eksploatacijskom polju ugljikovodika „Molve“. Prezentacija tvrtke INA, d.d. Zagreb (neobjavljeno).
13. LELAK, S., 2017. Izrada bočnog kanala eksploatacijske bušotine Molve-35R (Mol-35R) na eksploatacijskom polju ugljikovodika „Molve“. Prezentacija tvrtke INA, d.d. Zagreb (neobjavljeno).
14. MATANOVIĆ, D., MOSLAVAC, B., 2011. Opremanje i održavanje bušotina. Zagreb: AREA d.o.o.
15. MILLHEIM, K.K., PROHASKA, M., THOMPSON, B., 1995. Slim Hole Drilling Technology –Past, Present, Future, SPE 30151, SPE PetroVietnam '95, Ho Chi Minh, Vietnam, 1-3 March 1995.
16. PERIĆ, M., 2007. Englesko hrvatski enciklopedijski rječnik istraživanja i proizvodnje nafte i plina, Zagreb.
17. RANDOLPH, S., BOSIO, J., BOYINGTON, B., 1991. Slimhole Drilling: The Story So Far..., Schlumberger Oilfield Review, str. 46-54.
18. ROSS, M., ULRICH, C., KLOTZ, C., 2012. Rib-Steered Motor Technology: The Revolutionary Approach Extends the Coiled Tubing Drilling Application Scope, SPE

153573, SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference & Exhibition, The Woodlands, Texas, SAD, 27-28 March 2012.

19. VUKOBRATOVIĆ, Ž., IVAZ, P., OPAŠIĆ, Z., ČOGELJA, Z., 2016. Rezultati geološkog praćenja istražne bušotine Molve-35R (Mol-35R) s interpretacijom podataka LNB. Tehničko-tehnološka dokumentacija tvrtke INA, d.d. Zagreb.
20. VUKOVIĆ, S., 2000. Tehnologija izrade bočnih (re-entry) bušotina, Diplomski rad. Zagreb, Arhiva knjižnice Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta.
21. Advancements In Coiled Tubing Technology – Coiled Tubing and the Potential for Mainstream use in the Future, URL: <https://drilleng-group7-casngstrngdesig2.wikispaces.com/Advancements+In+Coiled+Tubing+Technology> (27.12.2017.)
22. Coiled tubing drilling, URL: http://petrowiki.org/Coiled_tubing_drilling (27.12.2017.)
23. Directional drilling and tunneling, URL: <https://www.nap.edu/read/2349/chapter/8> (26.12.2017.)
24. Drill pipe & BHA, URL: <http://www.ekomeri.com/drill-pipe-bha/> (28.12.2017.)
25. Oil & Gas Journal: North German operator uses learning curve to improve horizontal drilling techniques, URL: <http://www.ogj.com/articles/print/volume-95/issue-48/in-this-issue/general-interest/north-german-operator-uses-learning-curve-to-improve-horizontal-drilling-techniques.html> (26.12.2017.)
26. PEH: Coiled tubing Well Intervention and Drilling Operations, URL: http://petrowiki.org/PEH:Coiled-Tubing_Well_Intervention_and_Drilling_Operations (28.12.2017.)
27. Schlumberger Oilfield Glossary – slim hole well, URL: http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/s/slim_hole_well.aspx (20.12.2017.)

IZJAVA

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

Mirko Semren